

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Branko D. Milosavljević

TEORIJSKO I ESKPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE  
PONAŠANJA VEZE ARMIRANOBETONSKOG  
I ČELIČNOG ELEMENTA PREKO  
ARMATURNIH SPOJNICA

doktorska disertacija

Beograd, 2014.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Branko D. Milosavljević

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH  
OF THE BEHAVIOUR OF REINFORCED  
CONCRETE AND STEEL ELEMENT  
CONNECTION BY REBAR COUPLERS

doctoral thesis

Belgrade, 2014

**Doktorska disertacija:** TEORIJSKO I ESKPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE  
PONAŠANJA VEZE ARMIRANOBETONSKOG I  
ČELIČNOG ELEMENTA PREKO ARMATURNIH  
SPOJNICA

**Kandidat:** Mr Branko D. Milosavljević, dipl.građ.inž.

**Mentor:** Prof. dr Dušan Najdanović, dipl.građ.inž.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

**Članovi komisije za  
ocenu i odbranu:** Prof. dr Dušan Najdanović, dipl.građ.inž.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Dejan Bajić, dipl.građ.inž.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Zlatko Marković, dipl.građ.inž.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski Fakultet

Prof. dr Đorđe Lađinović, dipl.građ.inž.  
Fakultet tehničkih nauka - Novi Sad

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

## Od autora

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr Dušanu Najdanoviću na pomoći u izradi ove doktorske disertacije, kao i ostalim članovima komisije na korisnim savetima.

Posebnu zahvalnost dugujem kompaniji "ERICO", koja je donirala mehaničke spojnice sistema "LENTON" za potrebe eksperimentalnog istraživanja.

Veliku podršku mi je pružio Građevinski fakultet u Beogradu, naročito zaposleni u Laboratoriji za materijale i Laboratoriji za materijale i konstrukcije. Zahvaljujem se Mladenu, Savi, Radetu i Zlatku na pomoći pri eksperimentalnom delu istraživanja.

U izradi uzoraka su učestvovalе firme "DENEZA" i "VV Čelik" iz Beograda, a uspehu eksperimentalnog istraživanja je naročito doprineo kolega Mićko Pavlović, na čemu mu se zahvaljujem.

Kolegi Milanu Spremiću se zahvaljujem na veoma korisnim savetima, a posebno želim da se zahvalim kolegi Marku Pavloviću na dragocenoj pomoći u izradi numeričkih modela.

Za moju Biljanu, Iliju i Elenu.



# TEORIJSKO I ESKPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE PONAŠANJA VEZE ARMIRANOBETONSKOG I ČELIČNOG ELEMENTA PREKO ARMATURNIH SPOJNICA

## REZIME

Savremenu primenu spregnutih konstrukcija od armiranobetonskih i čeličnih elemenata prate intenzivna istraživanja njihovih međusobnih veza. Istovremeno, nova tehnološka rešenja, vezana za pojednostavljenje oplata i povećanje brzine betoniranja, donose sve širu upotrebu armaturnih mehaničkih spojnica, pre svega za nastavljanje armature, ali i kao jedan od načina za vezu armiranobetonskih i čeličnih elemenata. Osnovni cilj istraživanja u okviru ove teze je da se ispita mogućnost i način primene konektora formiranih od mehaničke spojnice sa armaturnim ankerom, ugrađenih u armiranobetonski element, i čeličnog zavrtnja, za prenos sila smicanja u okviru spoja čeličnog i armiranobetonskog elementa u spregnutoj konstrukciji. Posebno se kod ovakvih spojeva ističu problemi lokalnog naprezanja betona u zoni spoja, kao i problemi vezani za prenos sila smicanja, odnosno sila upravnih na pravac mehaničkih spojnica. Nakon izvršenog detaljnog istraživanja savremene naučnoistraživačke i stručne literature u oblasti smičućih veza u spregnutim konstrukcijama, u okviru ove teze su izvršena eksperimentalna, numerička i teorijska istraživanja granične nosivosti i ponašanja smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom. Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena na 18 uzoraka, raspoređenih u 5 serija. Numerička nelinearna analiza u programu ABAQUS sprovedena je na 28 numeričkih modela u konačnim elementima, prethodno kalibrisanih prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. U okviru ovih istraživanja je pokazano da se smičući konektori sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom, sa aspekta nosivosti, mogu koristiti kao elementi smičućih spojeva u spregnutim konstrukcijama, i da se njihovo ponašanje može uporediti sa ponašanjem naknadno ugrađenih ankera i ostalih ankera koji se ne sidre glavom. Na osnovu rezultata istraživanja je zaključeno da granična nosivost ispitivanog smičućeg konektora po betonu u blizini ivice, može biti određena korišćenjem izraza za određivanje iste nosivosti za naknadno ugrađene ankere, opterećene paralelno sa betonom, uz prethodno određivanje efektivne dužine

zamenjujućeg konektora sa mehaničkom spojnicom konstantnog poprečnog preseka. U okviru ove teze je razvijen je originalni izraz za određivanje ove dužine, u funkciji od prečnika zavrtnja, prečnika mehaničke spojnice i čvrstoće betona pri pritisku. Parametarskom analizom razmatran je uticaj čvrstoće betona pri pritisku, prečnika zavrtnja i spojnice kao i osnog rastojanja konektora od ivice armiranobetonskog elementa na njegovu nosivost i ponašanje, kao i efekat trenja između površina čeličnog i armiranobetonskog elementa u spregnutoj vezi opterećenoj na smicanje.

**Ključne reči:** Smičući konektor, Mehanička spojnica, Lom usled blizine ivice, Smičući spojevi u spregnutim konstrukcijama

**Naučna oblast:** Građevinarstvo

**Uža naučna oblast:** Armiranobetonske konstrukcije, Metalne konstrukcije

**UDK:** 624.012.45:624.014 (043.3)

# THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE AND STEEL ELEMENT CONNECTION BY REBAR COUPLERS

## ABSTRACT

Contemporary structures composed from reinforced concrete and steel elements use is followed by intensive research of their interconnection. Simultaneously, new technologies, regarding the simplification of formwork and concreting speed increase, are bringing mechanical couplers into the wider use, firstly as rebar splices, than as a mean of the connection between reinforced concrete and steel elements in composite structures. The main research goal within the theses is to investigate the possibilities and ways of use of the connectors composed from mechanical couplers with rebar anchors, embedded in concrete, and steel bolts, as a mean of shear transfer in composite structures connections. Specific issues related to this type of connections are local concrete pressure in the connector vicinity, as well as the shear flow along the connector axes. After detailed reviewing of the state of the art regarding shear connectors in composite structures, experimental, numerical and theoretical research on the shear connectors composed from mechanical couplers and rebar anchors resistance and behavior were conducted within this theses. The experimental research was conducted on 18 specimens, arranged in 5 series. Nonlinear numerical analyses, using ABAQUS software, was conducted on 28 numerical models in finite elements, after calibration with the experimental research results. The research resulted in conclusion that the shear connectors composed from mechanical couplers and rebar anchors have sufficient capacity to be used as shear connectors in composite structures, and that their behavior is similar to behavior of post installed anchors, as well as other types of connectors anchored without the head. Based in the research results, it can be concluded that the concrete edge breakout capacity of the investigated connectors subjected to the shear load parallel to the edge can be calculated using the formula for post installed anchors, after determining the effective length of the corresponding constant diameter shear connector with mechanical coupler. The original formula for determining of this length, as a function of coupler and rebar anchor diameter, as well as the concrete compression

strength, was developed within this thesis. Parametric analysis were conducted in order to determine the influence of the concrete compression strength, the bolt and coupler diameter and the edge distance on shear connectors capacity and behavior, as well as the effect of friction between steel and concrete surface.

**Keywords:** Shear connector, Mechanical coupler, Concrete edge breakout, Shear connections in composite structures

**Science field:** Civil Engineering

**Narrow scientific field:** Reinforced concrete structures, Steel structures

**UDK: 624.012.45:624.014 (043.3)**

## Sadržaj

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Uvod .....  | 1  |
| 1.1   | Veze čelilčnih i armiranobetonskih elemenata .....  | 1  |
| 1.2   | Mehaničke armaturne spojnice .....  | 4  |
| 1.3   | Predmet i ciljevi istraživanja.....   | 6  |
| 1.4   | Metode istraživanja.....  | 11 |
| 1.5   | Oblast i sadržaj disertacije .....  | 11 |
| 2     | Pregled literature.....   | 13 |
| 2.1   | Opšte .....   | 13 |
| 2.2   | Zavareni moždanici sa glavom .....  | 13 |
| 2.2.1 | Nosivost i tehničke norme .....   | 13 |
| 2.2.2 | Istraživanja u oblasti zavarenih moždanika sa glavom opterećenih na smicanje .....          | 16 |
| 2.3   | Ugrađeni zavrtnjevi.....  | 20 |
| 2.4   | Naknadno ugrađeni – bušeni ankeri.....  | 24 |
| 2.4.1 | Istraživanja u oblasti naknadno ugrađenih ili bušenih ankera opterećenih na smicanje .....  | 24 |
| 2.4.2 | Nosivost na lom usled blizine ivice ankera opterećenih na smicanje paralelno sa ivicom..... | 33 |
| 2.5   | Konektori sa mehaničkim spojnica.....   | 35 |
| 3     | Eksperimentalna istraživanja.....   | 40 |
| 3.1   | Program eksperimentalnih istraživanja.....  | 40 |
| 3.2   | Priprema uzoraka .....  | 45 |
| 3.3   | Karakteristike materijala.....  | 47 |
| 3.3.1 | Beton.....  | 47 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.3.2 | Zavrtnjevi .....   | 49  |
| 3.3.3 | Mehaničke spojnice LENTON .....                            | 52  |
| 3.3.4 | Armatura za ankere.....                                    | 55  |
| 3.4   | Dispozicija i postupak ispitivanja uzoraka .....           | 57  |
| 3.5   | Rezultati ispitivanja uzoraka.....                         | 60  |
| 3.5.1 | Rezultati ispitivanja uzoraka serije A.....                | 63  |
| 3.5.2 | Rezultati ispitivanja uzoraka serije B .....               | 67  |
| 3.5.3 | Rezultati ispitivanja uzoraka serije C .....               | 71  |
| 3.5.4 | Rezultati ispitivanja uzorke serije D.....                 | 73  |
| 3.5.5 | Rezultati ispitivanja uzoraka serije E .....               | 75  |
| 3.5.6 | Oštećenja mehaničkih spojnica .....                        | 76  |
| 3.6   | Analiza eksperimentalnih rezultata.....                    | 79  |
| 3.6.1 | Način loma ispitivanih uzoraka .....                       | 79  |
| 3.6.2 | Nosivost ispitivanih smičućih konektora.....               | 81  |
| 3.6.3 | Pomeranje i duktilnost ispitivanih smičućih veza .....     | 83  |
| 4     | Numerička analiza uspitivanih modela .....                 | 85  |
| 4.1   | Uvod.....  | 85  |
| 4.2   | Dispozicija modela i granični uslovi.....                  | 85  |
| 4.3   | Mreža konačnih elemenata .....                             | 89  |
| 4.4   | Modeliranje materijala.....                                | 90  |
| 4.4.1 | Čelik .....  | 90  |
| 4.4.2 | Beton.....   | 96  |
| 4.5   | Postupak nanošenje opterećenja u numeričkom modelu .....   | 101 |
| 4.6   | Način numeričkog proračuna.....                            | 102 |
| 4.7   | Analiza rezultata numeričkog proračuna .....               | 102 |
| 4.7.1 | Analiza funkcije opterećenja i vertikalnog pomeranja ..... | 102 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.7.2 | FE modeliranje graničnog stanja nosivosti i oštećenja na modelu.....  | 107 |
| 5     | Numerička parametarska analiza.....   | 112 |
| 5.1   | Uvod.....   | 112 |
| 5.2   | Geometrijske karakteristike modela i mehaničke karakteristike materijala ..                                       | 112 |
| 5.3   | Rezultati proračuna na numeričkim FE modelima u okviru parametarske analize.....                                  | 115 |
| 5.4   | Analiza rezultata numeričkog proračuna na FE modelima u okviru parametarske analize.....                          | 121 |
| 5.4.1 | Uticaj razmatranih parametara na graničnu nosivost smičućeg konektora na smicanje po zavrtnju .....               | 122 |
| 5.4.2 | Uticaj razmatranih parametara na maksimalna vertikalna pomeranja smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom ..... | 123 |
| 5.5   | Uticaj zazora između čelične flanše i površine betona na ponašanje i nosivost smičućeg konektora .....            | 128 |
| 6     | Nosivost i ponašanje smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom.....  | 131 |
| 6.1   | Uvod.....   | 131 |
| 6.2   | Način loma smičućeg konektora.....  | 131 |
| 6.3   | Analiza naprezanja smičućeg spoja u numeričkom modelu.....  | 133 |
| 6.3.1 | Lokalna naprezanja betona u okolini konektora.....  | 134 |
| 6.3.2 | Analiza naprezanje smičućeg konektora .....   | 137 |
| 6.3.3 | Lokalna naprezanja mehaničke spojnice .....   | 140 |
| 6.3.4 | Uticaj trenja između flanše i površine betona na nosivost smičućeg spoja  | 142 |
| 6.3.5 | Efektivna dužina smičućeg konektora.....  | 144 |
| 6.4   | Proračun granične nosivosti smičućeg konektora.....   | 148 |
| 6.4.1 | Granična nosivost smičućeg konektora na smicanje po čeliku .....  | 149 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.4.2 | Granična nosivost smičućeg konektora u blizini ivice betona .....        | 151 |
| 6.5   | Pomerljivost i duktilnost smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom ... | 164 |
| 7     | Zaključci i završna razmatranja .....                                    | 168 |
| 8     | Literatura .....   | 171 |

Biografija autora

PRILOG 1: Izjava o autorstvu

PRILOG 2: Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

PRILOG 3: Izjava o korišćenju



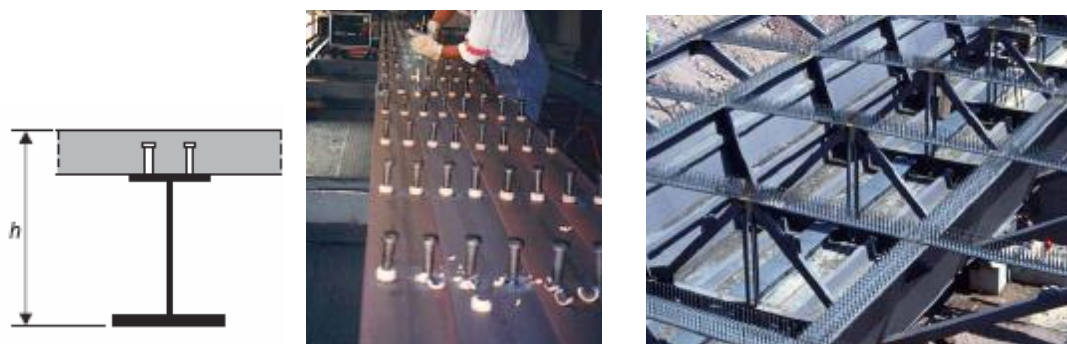
# 1 Uvod

Savremeno građevinsko konstrukterstvo u sve većoj meri podrazumeva primenu spregnutih konstrukcija od armiranobetonskih i čeličnih elemenata. Posebno se, tom prilikom, sve više ističu problemi veza čeličnih i armiranobetonskih elemenata spregnute konstrukcije. Rešenja veze čeličnih i armiranobetonskih elemenata u klasičnim spregnutim konstrukcijama su detaljno analizirana i teorijski i eksperimentalno i o tome postoje brojni radovi u literaturi. Nova tehnološka rešenja, vezana za pojednostavljenje oplata i povećanje brzine betoniranja, donose sve širu upotrebu armaturnih mehaničkih spojnica, pre svega za nastavljjanje armature, ali i kao jedan od načina za vezu armiranobetonskih i čeličnih elemenata. Ovakva veza podrazumeva da se mehanička spojnica sa armaturnim ankerom ugrađuje u armiranobetonski element, a veza sa čeličnim elementom se ostvaruje naknadno, po skidanju oplata, ugradnjom zavrtnja u ubetoniranu mehaničku spojnicu, čime se formira montažno demontažna veza. Korišćenje mehaničkih spojnica aktuelno je u svetu, dok su primeri njihove upotrebe u srpskoj građevinskoj praksi veoma retki. Posebno se kod ovakvih veza ističu problemi lokalnog naprezanja betona u zoni spoja, kao i problemi vezani za prenos sila smicanja, odnosno sila upravnih na pravac mehaničkih spojnica. Istraživanja ovakve primene spojnica, naročito za prijem smicanja, su malobrojna, i nema dovoljno podataka za ocenu nosivosti i ponašanje ovakvih smičućih veza.

## 1.1 Veze čeličnih i armiranobetonskih elemenata

Elementi veze između armiranobetonskog i čeličnog elementa u spregnutoj konstrukciji, kao što je poznato, treba da obezbede zajednički rad čelika i betona. Kod klasične spregnute veze čeličnog nosača i armiranobetonske ploče, kontinuirano raspoređeni elementi veze u obliku zavarenih moždanika sa glavom (slika 1.1), dominantno su opterećeni na smicanje. Kada su u pitanju montažne konstrukcije, elemente veze je potrebno diskretizovati u zone spojeva montažnih ili polumontažnih ploča, kada se mogu koristiti kruti "blok" moždanici ili, kao duktilnije rešenje, grupe zavarenih moždanika sa glavom (slika 1.2). Montaža armiranobetonskih ploča moguća je i uz primenu ubetoniranih zavrtnjeva. Kao varijanta klasične veze preko zavarenih moždanika, razvijane su i istraživane veze preko samourezivih moždanika, zavarenih ugaonih i L profila, perforiranih zavarenih limova, zavarenih limova raznih oblika ("Y",

“Puzzle strip” i sl.). Sve navedene varijante uglavnom podrazumevaju AB ploču betoniranu na licu mesta.



**Slika 1.1** Sprezanje zavarenim moždanicima sa glavom [Koster, 2005]

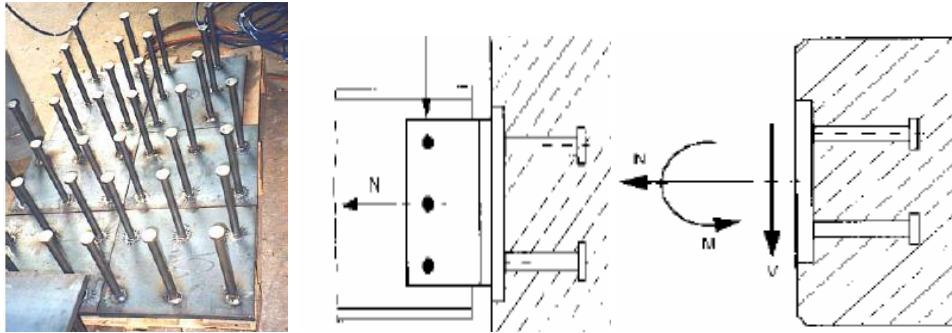


**Slika 1.2** Montažne AB ploče spregnute grupom moždanika [Koster, 2005]

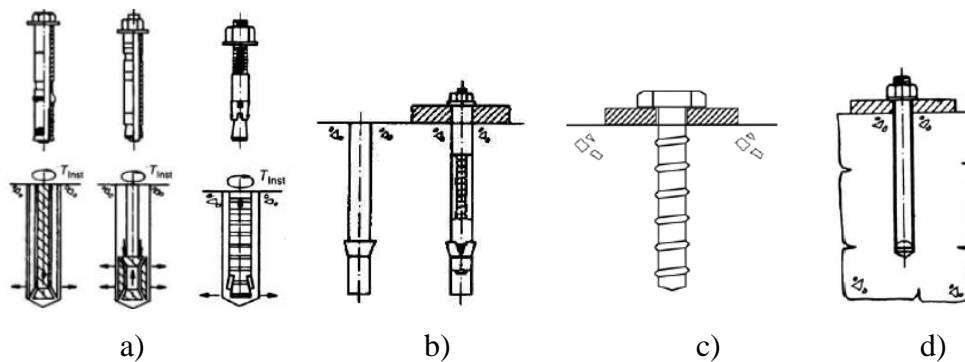
Veze koje obezbeđuju zajednički rad armiranobetonskih ploča i čeličnih nosača karakteristične su pre svega za spregnute mostove, kao i spregnute tavanice u zgradarstvu. Kod spregnutih ramovskih konstrukcija, veza između čelične grede i vertikalnog armiranobetonskog elementa (stub ili zid, slika 1.3) podrazumeva ugradnju elemenata za vezu (slika 1.4) ili naknadno bušenje i ugrađivanje ankera (slika 1.5)



**Slika 1.3** Veza čelične grede sa AB elementima konstrukcija [Grosser, 2012]

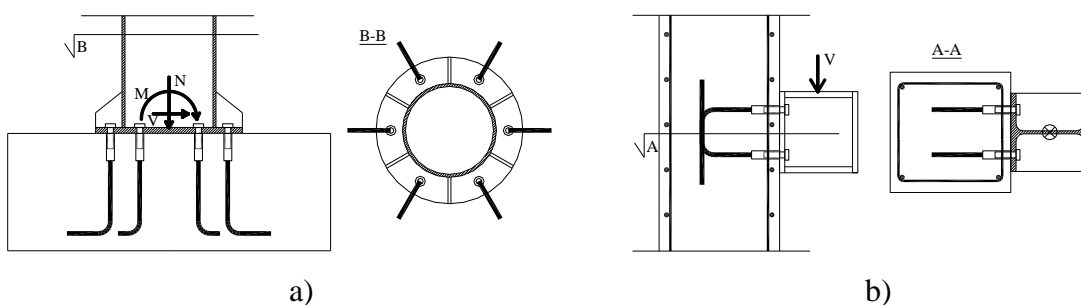


**Slika 1.4** Veza čelične grede sa AB elementom preko ugrađene ploče sa zavarenim moždanicima sa glavom [Koster, 2005]



**Slika 1.5** Ankeri za naknadno ugrađivanje (bušeni): a) ekspanzioni sa kontrolisanom silom, b) sa proširenom bazom, c) zavrtnji za beton i d) sa prijanjanjem [Hoehler, 2006]

Posebnu grupu ankera koji se prethodno ugrađuju u beton čine ankeri formirani od mehaničke armaturne spojnice i armaturnog ankera u koje se ugrađuje zavrtnj. Osnovna namena ovakvih ankera je za vezu čeličnih stubova i armiranobetonkih temelja, kada se zavrtnji, dominantno aksijalno opterećeni usled uticaja iz stuba, sidre preko spojnice i armaturnog ankera u temelj (slika 1.6 a). Ukoliko se ovakav koncept primeni na vezu čelične grede i stuba, zavrtnji i spojnice u vezi su pretežno opterećeni na smicanje (slika 1.6 b).



**Slika 1.6** Veza preko zavrtnjeva i mehaničke spojnice: a) čelični stub-AB temelj b) čelični element-AB stub

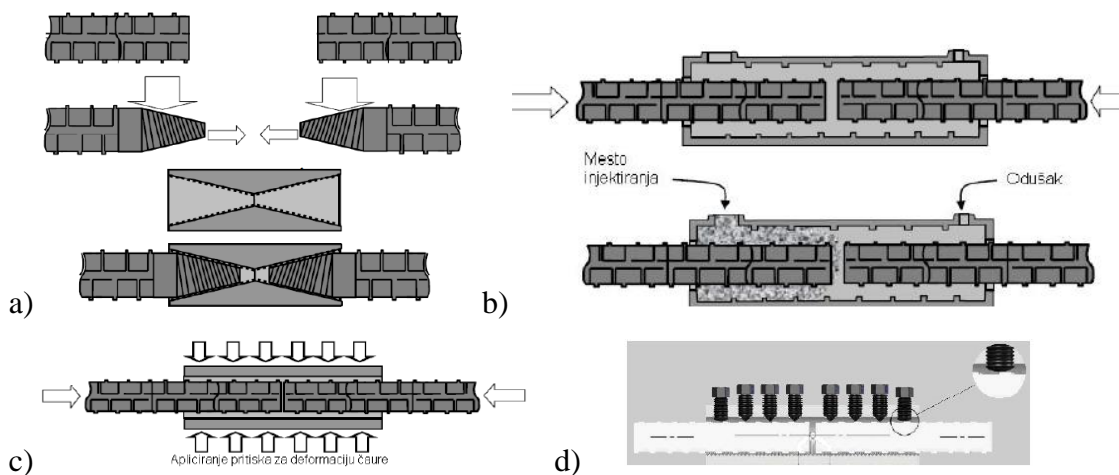
## 1.2 Mehaničke armaturne spojnice

Mehaničke armaturne spojnice (u daljem tekstu mehaničke spojnice, uz napomenu da su u praksi poznate i pod nazivom "kapleri") su dizajnirane prvenstveno za nastavljavanje šipki armature u armiranobetonskim elementima. Namenjene su za situacije kada klasični način nastavljavanja armature – preklapanje i zavarivanje nije moguće primeniti, na primer:

- kod nastavljavanja armature sa visokim procentima armature u preseku, i velikim profilima armature,
- kod nastavljavanja maksimalno napregnute zategnute armature u elementima male širine (zidni nosači) ili malih dimenzija (zatege)
- kada, iz tehnoloških razloga, na prekidima betoniranja nije moguće prepustiti armaturu za preklop u potrebnoj dužini
- kada je potrebno nastaviti više od 50% armature, a to propisima za nastavljavanje preklapanjem nije dopušteno,
- kod specifičnih metoda građenja (metod gradnje "top-down", na pr.).

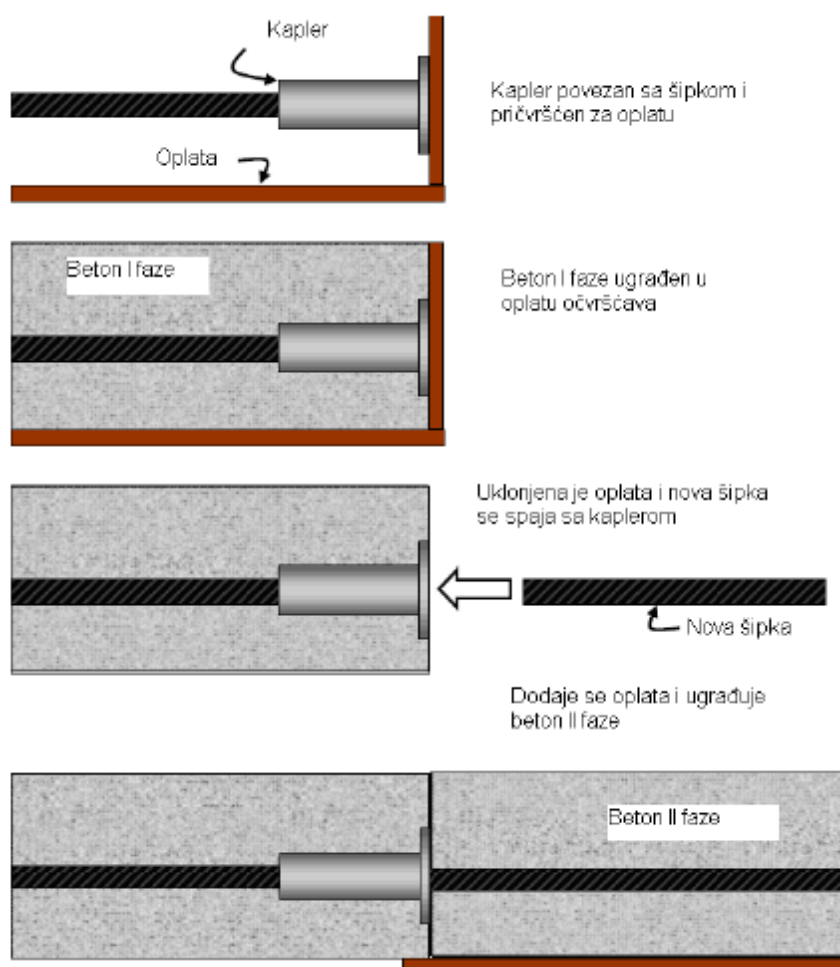
U poslednoj deceniji razvijen je i patentiran veliki broj različitih tipova mehaničkih spojnica. Po načinu prenošenja sile između dve nastavljene šipke armature, mehaničke spojnice se mogu podeliti u sledeće grupe:

- spojnice sa navojem (slika 1.7 a),
- spojnice sa ispunom cementnom ili epoxy emulzijom (slika 1.7 b),
- spojnice sa deformisanom čaurom (slika 1.7c),
- spojnice sa ugrađenim zavtnjevima (slika 1.7 d).



**Slika 1.7** Tipovi mehaničkih armaturnih spojnica [Brungraber, 2009]

Posebna pogodnost primene mehaničkih spojnica je mogućnost formiranja nastavaka armiranobetonskih elemenata bez prekidanja oplata u prvoj fazi betoniranja, odnosno bez prepuštanja ankera kroz oplatu. Na taj način se omogućava upotreba velikih inventarskih komada oplata, klizne oplata i sl., bez njihovog oštećenja. Princip nastavljanja armature mehaničkim spojnica kroz faze betoniranja je prikazan na slici 1.8.



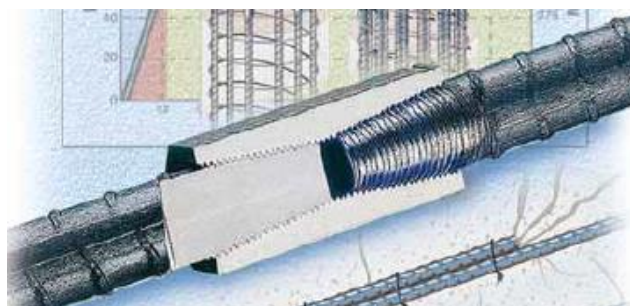
**Slika 1.8** Nastavljanje armature mehaničkim spojnica kroz faze betoniranja

Poseban slučaj primene mehaničkih spojnica, kao što je pomenuto u prethodnoj tački, predstavljaju mehaničke spojnice koje nastavljaju armaturu sa jedne, i standardni čelilčni zavrtnanj sa druge strane. Ovakva kombinacija se koristi za vezu čeličnog i armiranobetonskog elementa kao što je prikazano na slici 1.6. Veza čeličnog i armiranobetonskog elementa preko mehaničkih spojnica opterećenih na smicanje predstavlja predmet istraživanja u okviru ove teze.

### 1.3 Predmet i ciljevi istraživanja

Smičući spojevi čeličnih i armiranobetonskih elemenata spregnutih konstrukcija pomoću klasičnih zavarenih moždanika sa glavom, "blok" moždanika i, u poslednje vreme, ubetoniranih zavrtnjeva, predstavljaju predmet brojnih i obimnih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja, iz kojih su proistekli odgovarajući modeli proračuna, kao i odredbe u odgovarajućim tehničkim normama. S druge strane, upotreba mehaničkih spojnica u građevinskoj praksi opšte je prihvaćena, a na tržištu se mogu naći različiti tipovi ovih elemenata, koje proizvodi veliki broj specijalizovanih firmi u svetu. Kada je u pitanju upotreba mehaničkih spojnica za nastavak armature i zavrtnja, kojom se može ostvariti veza između čeličnog i armiranobetonskog elementa, u praksi se ovakva veza koristi uglavnom za prenos aksijalnih sila, na primer kod veze čeličnog stuba i temelja (slika 1.6 a). S tim u vezi, dizajn i ispitivanje mehaničkih spojnica, a pogotovu klasičnih mehaničkih spojnica za nastavljavanje armature, sprovodi se za opterećenje silom zatezanja [Fallon, 2005].

Upotreba mehaničkih spojnica za vezu čeličnog i betonskog elementa koja je dominantno opterećenje na smicanje (slika 1.6 b), relativno je neistražena, posebno sa aspekta prenosa sile smicanja sa čeličnog elementa na armiranobetonski. Prilikom upotrebe mehaničkih armaturnih spojnica za nastavljavanje armature kod prekida betoniranja u armiranobetonskom elementu, smicanje se u armiranobetonskom preseku na mestu nastavljanja armature prenosi preko "interloka" agregata, bez značajnijeg uticaja mehaničkih spojnica [Sanada et al., 2011]. Međutim, kod smičuće veze čeličnog i armiranobetonskog elementa, smicanje se prenosi uglavnom preko moždaničkog dejstva zavrtnja i mehaničke spojnice, uz manji doprinos trenja između naležućih površina čeličnog i armiranobetonskog elementa.

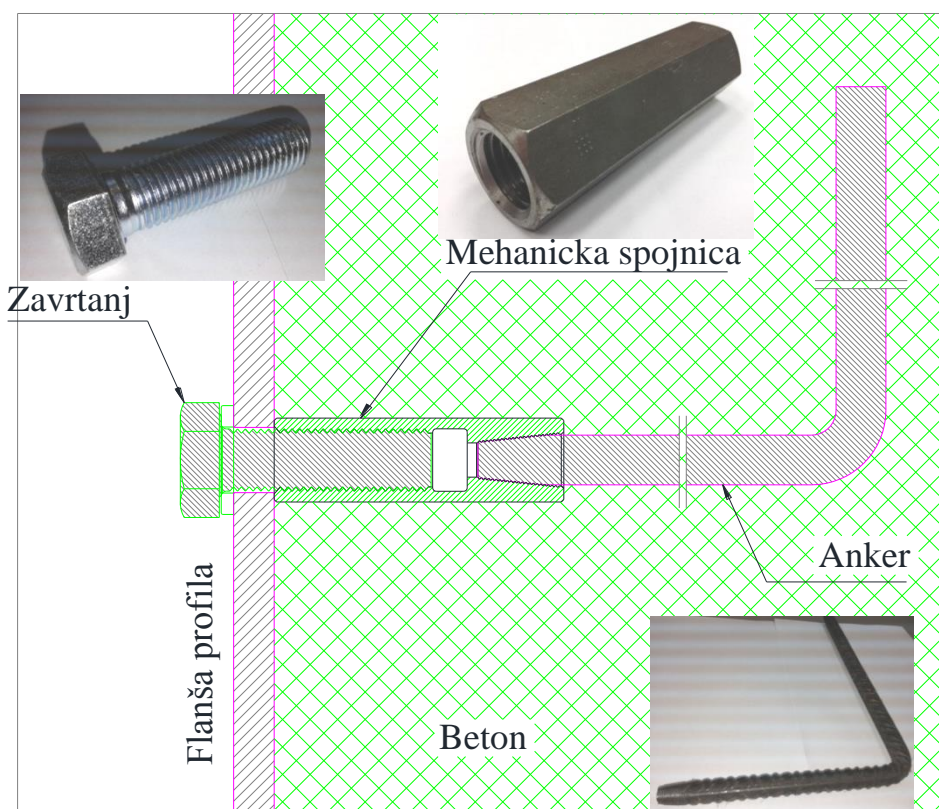


**Slika 1.9** Lenton mehanička spojnica sa koničnim navojem [Lenton Katalog, 2009]



Za predmet istraživanja u ovom radu su odabrane mehaničke spojnice koje proizvodi firma "Lenton" sa sedištem u Tilburgu, Holandija, i predstavlja deo internacionalnog sistema ERICO. Firma "Lenton" je, uz ostale proizvođače, tokom poslednje decenije, ukazivala na potrebu donošenja tehničkih normi u oblasti mehaničkog nastavljanja armature i pružila podršku u procesu stvaranja istih, kroz učešće i pomoć u različitim istraživanjima u ovoj oblasti širom Evrope. U okviru tog procesa ostvarena je naučno tehnička saradnja sa Građevinskim fakultetom Univerziteta u Beogradu, a ovo istraživanje predstavlja deo te saradnje. Karakteristična "Lenton" mehanička spojnica za nastavak armaturnih šipki preko koničnog navoja prikazana je na slici 1.9 [Lenton Katalog, 2009].

"Lenton" je isporučio potrebne mehaničke spojnice koje, u skladu sa programom istraživanja u okviru ove teze, predstavljaju deo složenog konektora za vezu između čelika i betona, dominantno opterećenu na smicanje (u deljem tekstu smičući konektor). Pored mehaničke spojnice, smičući konektor se sastoji od zavrtnja sa podloškom i armaturnog anкера, kao što je prikazano na slikama 1.10 i 1.11.



**Slika 1.10** Delovi smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom

Cilj ovog istraživanja je da se utvrdi ponašanje i nosivost smičuće veze čeličnog i armiranobetonskog elementa preko smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom.



**Slika 1.11** Smičući konektor pre i posle kompletiranja

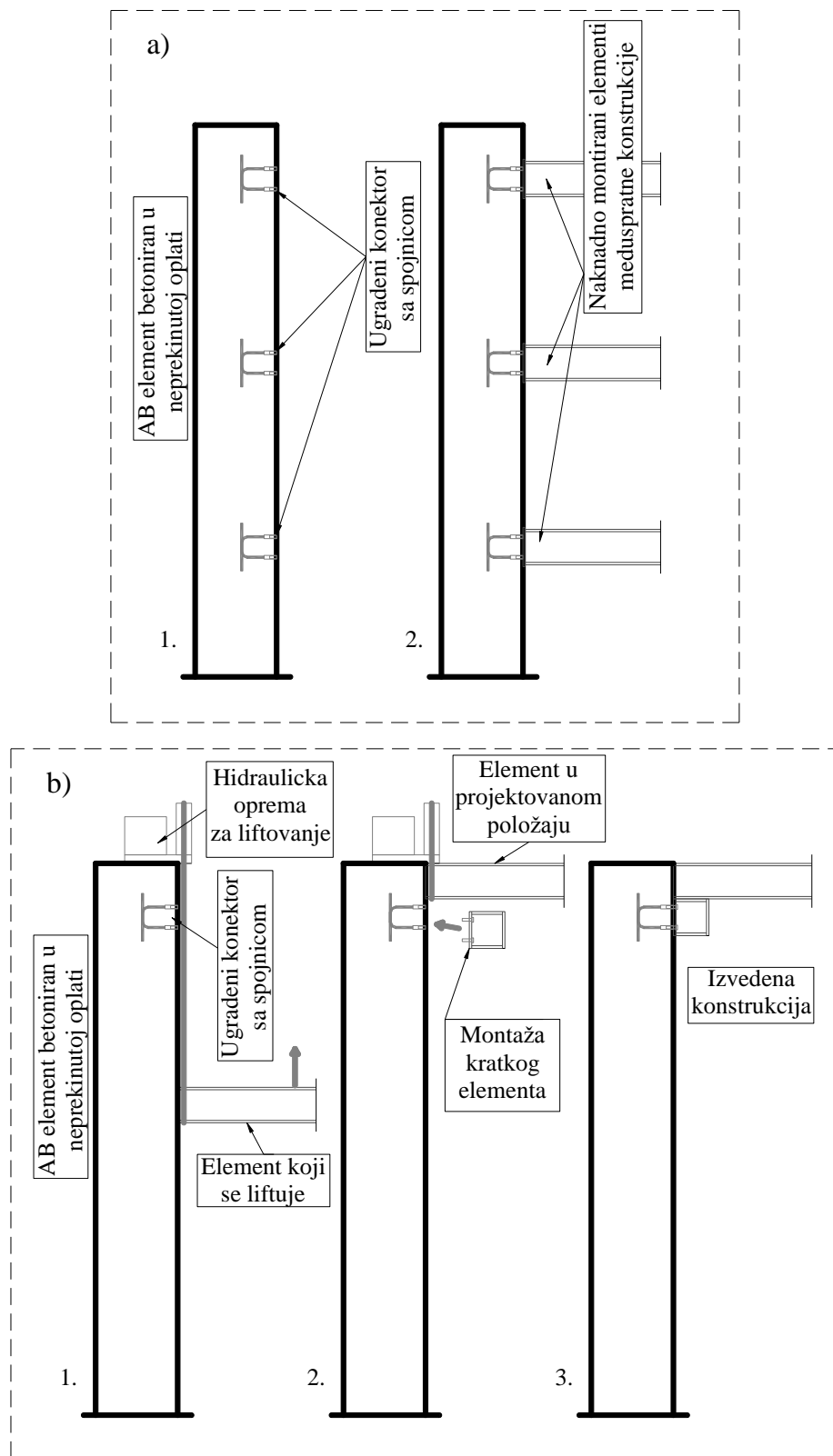
Istraživanje bi doprinelo široj upotrebi mehaničkih spojnica, kao relativno nove tehnologije nastavljanja armature, i to ne samo za direktno prenošenje sile zatezanja između dve nastavljene šipke armature, ili šipke i čeličnog zavrtnja, već i upotrebom mehaničke spojnice kao elementa smičućeg konektora, izloženog složenom lokalnom naprezanju na kontaktu sa čeličnim profilom i okolnim betonom na mestu spoja.

Ovakav smičući konektor svoju širu upotrebu mogao bi da nađe u oblasti montažnih spregnutih konstrukcija, pogotovu u slučajevima kada se zahteva i demontaža. Primer za to su montažno-demontažni mostovi za višestruku upotrebu, pri privremenom preusmeravanju drumskog i pešačkog sadržaja, kao i druge vrste montažnih spregnutih nosača od čelika i betona u mostogradnji i zgradarstvu.

Smičući konektori sa mehaničkim spojnica su veoma pogodni za primenu u konstrukcijama višespratnih zgrada i objekata kod kojih se sprovodi kontinualno betoniranje vertikalnih armiranobetonskih elemenata konstrukcije, naročito pri upotrebi kliznih oplata, čime se omogućuje neprekidno betoniranje i naknadno vezivanje čeličnih elemenata međuspratnih konstrukcija (slika 1.12a).

Montažna gradnja, između ostalog, podrazumeva i podizanje grednih elemenata "liftovanjem" uz vertikalne elemente kao što su armiranobetonski zidovi i stubovi, korišćenjem presa sa čeličnim užadima ili lancima. Tom prilikom se oslonci u obliku kratkih elemenata moraju naknadno montirati, kako ne bi predstavljali prepreku pri dizanju (slika 1.12b). Smičući konektori sa mehaničkom spojnicom predstavljaju veoma pogodno rešenje za naknadno povezivanje oslonaca sa zidovima i stubovima.





**Slika 1.12** Primena konektora sa spojnicom kod naknadne ugradnje i "liftovanja" elemenata konstrukcije

S obzirom da ovo istraživanje treba da doprinese široj upotrebi ovakvih konektora, eksperimentalni uzorci i numerički modeli su izrađeni tako da, koliko je to moguće, odgovaraju ovakvim elementima u uslovima u praksi. Tako je korišćen beton iz fabrike betona, sa uobičajenim recepturama, betoniranje je izvršeno u gradilišnim uslovima, a trenje između čeličnih i betonskih elemenata nije eliminisano podmazivanjem. Ovakav pristup povećeva broj relevantnih parametara (trenje, tolerancije u dimenzijama i ravnosti površina), što, u određenoj meri, doprinosi složenosti modela, većem rasipanju i težem tumačenju rezultata, ali svakako doprinosi boljoj i realnijoj proceni i modeliranju ponašanja ovakvih veza u realnim konstrukcijama. Usvojene su širine armirano betonskog elementa uzorka od 30 i 40cm, što odgovara realnim dimenzijama AB stubova u konstrukcijama u visokogradnji. Ograničena širina AB elemenata, a samim tim i položaj konektora blizu ivice betona, može da dovede do loma po betonu usled blizine konektora ivici elementa ("concrete edge failure", u daljem tekstu "lom usled blizine ivice"), što predstavlja još jedan od parametara obuhvaćenih ovim istraživanjem.

Predmet istraživanja je veza sa smičućim konektorom čiji je jedan od elemenata, mehanička spojnica, komercijalni proizvod, što predstavlja posebnu specifičnost. Ovakav proizvod je naravno, praćen sa svim potrebnim sertifikatima u skladu sa propisima, koje obezbeđuje proizvođač. Specifikacije i dokazi nosivosti i pomerljivosti su dati za osnovnu namenu mehaničke spojnice, a to je direktan prenos aksijalne sile sa jednog na drugi element u spoju. Što se tiče nekih nestandardnih i manje uobičajenih upotreba ovih elemenata, u šta bi se mogla uvrstiti i upotreba mehaničke spojnice u smičućem konektoru, proizvođač daje upozorenje da se takva primena mora poveriti ovlašćenim i stručnim projektantima i inženjerima. S tim u vezi, ovo istraživanje ima za cilj i da proveriti primenjivost modela datih u normama i literaturi za određivanje nosivosti do sada uobičajenih smičućih konektora (zavareni moždanici i bušeni ankeri), na smičuće konektore sa mehaničkim spojnica. Činjenicu da se radi o komercijalnom proizvodu, prati oskudna literatura o rezultatima detaljnih istraživanja ponašanja i nosivosti mehaničkih spojnica (kako je pokazano u poglavlju 2), čime je još više izražena potreba za ovim istraživanjem.

#### 1.4 Metode istraživanja

Istraživanje obuhvaćeno ovom disertacijom sadrži najpre pregled literature u oblasti veza u savremenim spregnutim konstrukcijama od čelika i betona. Ovo se pre svega odnosi na veze pomoću zavarenih moždanika, ubetoniranih zavrtnjeva i bušenih ankeri. Posebno se razmatra oblast mehaničkih spojnica, kao elemenata smičućih konektora, u cilju sagledavanja trenutnog stanja u istraživanjima u ovoj oblasti.

Eksperimentalni deo istraživanja je osmišljen kao niz od pet serija uzoraka za standardni "push-out" test sa po dva konektora u redu. Ispitivanjem uzoraka do loma treba da se odredi nosivost veze u pojedinim uzorcima, oblik pomeranja i maksimalna pomeranja između čeličnog i betonskih elemenata (vertikalno klizanje ili "slip"), kao i način i oblik loma.

Nakon eksperimentalnog dela sledi formiranje nelinearnog numeričkog modela u programu ABAQUS, primenom "Explicit" modula za dinamičku analizu, kao i "Damage" modela materijala [ABAQUS, 2012].

Numerički model u konačnim elementima se kalibriše na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja, posle čega je moguće sprovesti obimniju parametarsku analizu. Varirani parametri su čvrstoća betona pri pritisku, prečnik zavrtnja i odgovarajuće mehaničke spojnice, kao i rastojanje smičućeg konektora od ivice betonskog elementa.

Rezultati ove eksperimentalne i numeričke analize, u vidu nosivosti i pomerljivosti veze, kao i ponašanja konektora pri opterećivanju do loma, uz detaljan prikaz načina i mehanizma lokalnog naprezanja u okolini konektora, predstavljaju osnov za analizu mogućnosti primene postojećih modela i analitičkih izraza u normama i literaturi za veze sličnog tipa, uz eventualne njihove korekcije radi dobijanja pouzdanijih rezultata.

#### 1.5 Oblast i sadržaj disertacije

Metodologija naučno istraživačkog rada i rezultati eksperimentalnih i analitičkih istraživanja u okviru ove disertacije teze prikazani su u sedam poglavlja.

Prvo, uvodno poglavlje, sadrži prikaz najčešće primenjivanih tipova veza između čelika i betona u spregnutim konstrukcijama, kao i različitih vrsta mehaničkih spojnica. Predstavljeni su predmet i ciljevi istraživanja i data oblast i sadržaj disertacije.

U drugom poglavlju je dat pregled literature, i to u oblasti veza zavarenih moždanika sa glavom, ubetoniranih zavrtnjeva, bušenih ankera i konektora sa mehaničkim spojnica.

Treće poglavlje obuhvata eksperimentalni deo istraživanja, gde su, pre svega, prezentovani rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika materijala komponenata smičuće veze: zavrtnja, armaturnog ankera, mehaničke spojnice i betona, a zatim i detaljan opis svih pet serija uzoraka sa prikazom i analizom dobijenih rezultata nakon ispitivanja do loma.

U četvrtom poglavlju je prikazan numerički model, sa opisom načina modeliranja, usvojenih mehaničkih karakteristika materijala, mreže konačnih elemenata i graničnih uslova. Posebno su prikazani nelinearni modeli veze napon - deformacija komponentnih materijala, kao i usvojeni kritrijumi loma.

Sa usvojenim i kalibrisanim numeričkim modelom, u petom poglavlju je izvršena parametarska analiza variranjem najvažnijih parametara: čvrstoće betona pri pritisku, prečnika zavrtnja i rastojanja konektora od ivice betona.

U šestom poglavlju je izvršena uporedna analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja, i rezultata numeričke i parametarske nelinearne analize metodom konačnih elemenata. Istražena je mogućnost primene postojećih modela i izraza za odgovarajuće slične veze u naučnoj i stručnoj literaturi i normama, uz neophodne dopune i izmene, kao i definisanje potrebnih uslova, kako bi se omogućila njihova pouzdana primena na proračun smičućih konektora sa mehaničkim spojnica.

Poslednje, sedmo poglavlje sadrži završna razmatranja i prikaz najvažnijih zaključaka ove teze. Na osnovu ovih zaključaka su definisane određene preporuke za proračun i primenu istraživanih smičućih konektora sa mehaničkim spojnica, kao i odgovarajuće preporuke za buduća istraživanja u ovoj oblasti.

## **2 Pregled literature**

### **2.1 Opšte**

Zavareni moždanici sa glavom su najduže u upotrebi kada su u pitanju elementi spoja između čelika i betona, još iz vremena početka prošlog veka. Istraživanja u ovoj oblasti su daleko najbrojnija u odnosu na druge tipove konektora, kao i odgovarajuće propise i propisi za njihov proračun. Naknadno ugrađeni ili bušeni ankeri su poslednjih decenija u sve široj upotrebi, što takođe prati veoma intenzivno istraživanje, i odgovaraća zastupljenost u naučnoj, stručnoj literaturi, kao i u normama. Ubetonirani zavrtnjevi kao konektori u spregnutim montažnom konstrukcijama istraživani su u manjoj meri, a rezultati novijih istraživanja ukazuju na analogije sa zavarenim moždanicama, i osnova su za korekcije proračunskih modela i njihovo uvođenje u odgovarajuće norme.

Upotreba konektora sa mehaničkim spojnicama predstavlja relativno novu tehnologiju veze čeličnih i armiranobetonskih elementa. Istraživanja u ovoj oblasti su malobrojna. Razlog za to, uz činjenicu da su mehaničke spojnice od skoro u upotrebi, leži i u činjenici da su spojnice komercijalni proizvod, pa proizvođači uglavnom istraživanja tretiraju kao poslovnu tajnu. Takođe, osnovna namena mehaničke spojnice je nastavljanje zategnute armature, pa su, uglavnom, malobrojni rezultati istraživanja vezani za ovaj način primene. Korišćenje mehaničkih spojnica u smičućim spojevima predstavlja specifičan i praktično neistražen oblik primene, a eventualni rezultati istraživanja ovakvih konektora u literaturi su malobrojni, praktično nedostupni.

### **2.2 Zavareni moždanici sa glavom**

#### **2.2.1 Nosivost i tehničke norme**

Način loma zavarenih moždanika sa glavom, opterećenih na smicanje može, kao što je poznato, da bude po čeliku, smicanjem, betonu i kombinovani lom. O ostalim načinima loma, usled blizine ivice elementa i sl., biće reči u tački koja se odnosi na naknadno ugrađene ankere.

Prema [EC4, 2004] nosivost moždanika se proračunava prema sledećim izrazima (izraz (2.1) se odnosi na lom po čeliku, a izraz (2.2) na lom po betonu):

$$P_{RD} = 0.8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v} \quad (2.1)$$

$$P_{RD} = 0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \cdot \frac{1}{\gamma_v} \quad (2.2)$$

gde je:

- $d$  prečnik stabla moždanika sa glavom  $\text{Ø}16\text{mm} < d < \text{Ø}25 \text{ mm}$ ,
- $f_u$  čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika sa glavom,  $\leq 500 \text{ MPa}$ ,
- $f_{ck}$  karakteristična čvrstoća pri pritisku
- $E_{cm}$  sekantni modul elastičnosti betona,
- $h_{sc}$  ukupna visina moždanika sa glavom,
- $\gamma_v$  parcijalni koeficijent sigurnosti, preporučena vrednost prema EC4  
 $\gamma_v = 1.25$  je usvojena i u [NA SRPS EN 1994-1-1].

Koeficijent  $\alpha$  u izrazu (2.2) zavisi od visine moždanika:

$$\alpha = 0.2 \cdot (h_{sc}/d + 1) \quad \text{za } 3 \leq h_{sc}/d \leq 4 \quad (2.3)$$

$$\alpha = 1.0 \quad \text{za } h_{sc}/d > 4 \quad (2.4)$$

Slični su po strukturi izrazi za nosivost moždanika prema američkim propisi ma [ANSI 360-05, 2005], gde je karakteristična nosivosti moždanika sa glavom na smicanje:

$$Q_u = 0.5 \cdot A_s \sqrt{f_{ck} E_c} \leq A_s f_u \quad (2.5)$$

gde je:

- $A_s$  površina stabla moždanika,
- $E_c$  modul elastičnosti betona,
- $f_{ck}$  karakteristična čvrstoća betona pri pritisku,
- $f_u$  granična čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika.

Nešto je drugačija po strukturi izraza nosivost smičućeg moždanika po betonu prema japanskim propisima [JSCE, 2009], gde figuriše i linearni član (izraz (2.6)), dok je nosivost po čeliku data izrazom (2.7)

$$V_{sud} = \frac{31 A_s \sqrt{\frac{h_{sc}}{d} \cdot f_{cd}} + 10000}{\gamma_b} \quad (2.6)$$

$$V_{sud} = A_s \cdot f_{ud} / \gamma_b \quad (2.7)$$

uz uslov  $h_{sc}/d \geq 4$ , gde je:

- $A_s$  površina poprečnog preseka stabla moždanika,

$f_{cd}$  proračunska čvrstoća betona  $f_{cd} = f_{ck}/1.3$ , gde je  $f_{ck}$  karakteristična čvrstoća betona pri pritisku,

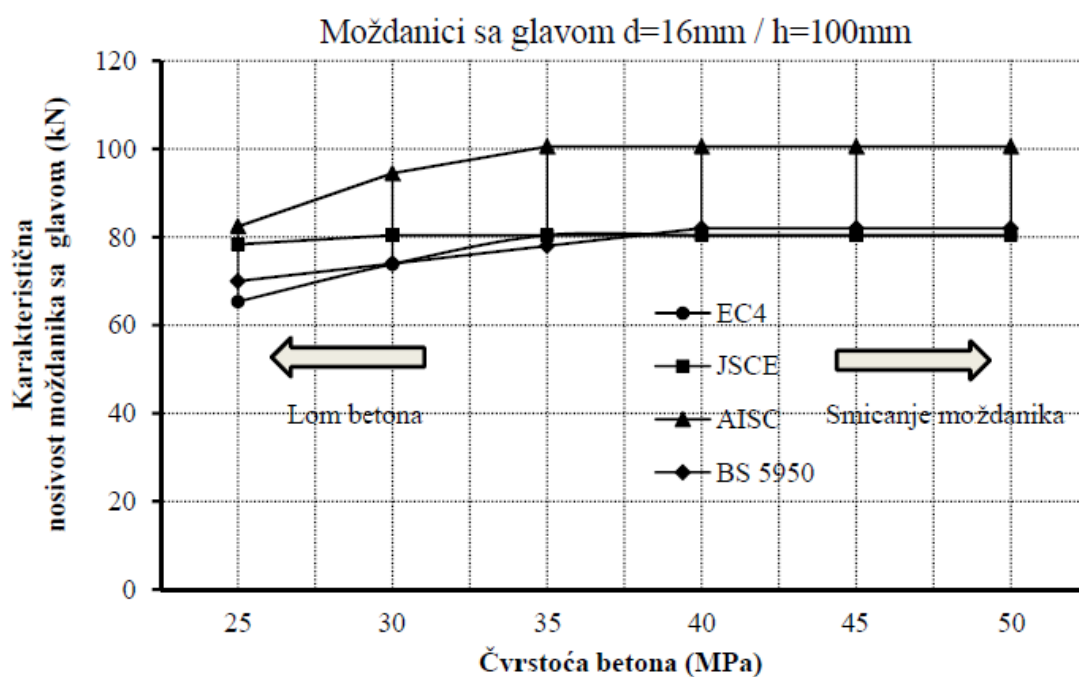
$f_{ud}$  proračunska čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika,  $f_{ud} = f_u/1.0$ ,

$f_u$  granična čvrstoća pri zatezanju materijala moždanika,  $f_u < 400$  MPa,

$\gamma_b$  parcijalni koeficijent sigurnosti,  $\gamma_b = 1.30$ .

Iz izraza (2.1) do (2.7) vidi se da svi propisi zahtevaju da visina moždanika bude veća od 4 prečnika, osim Evrokoda, koji dopušta, uz određenu redukciju, da ovaj odnos bude manji od 4, ali ne manji od 3.

Upoređenje nosivosti moždanika na smicanje po betonu za različite propise pregledno je prikazao [Spremić, 2013], na primeru moždanika prečnika 16 mm i visine 100 mm, prikazano na slici 2.1.



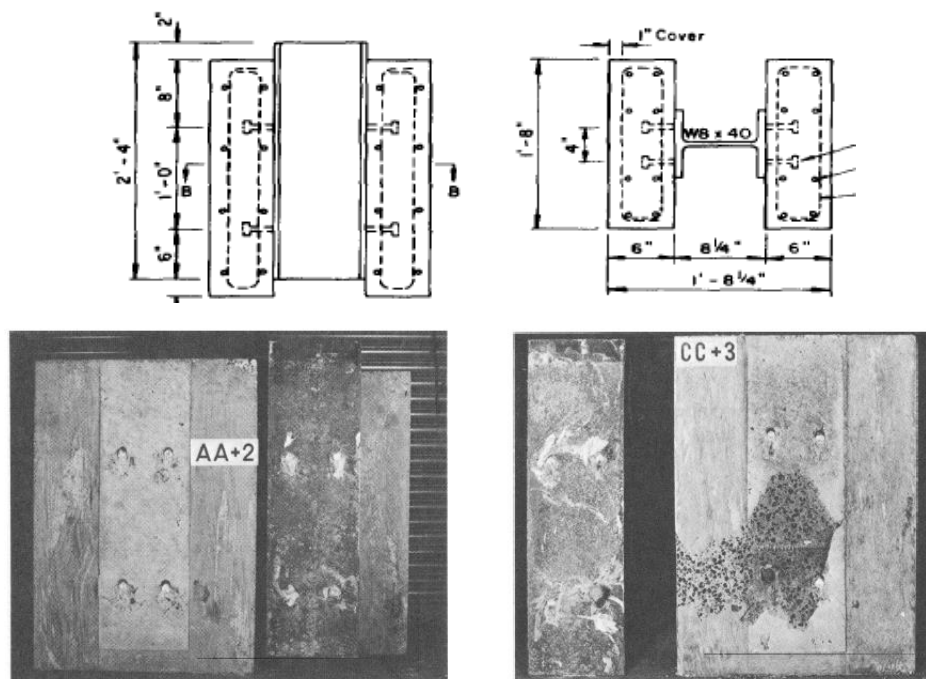
**Slika 2.1** Uporedna nosivost moždanika [Spremić, 2013]

Pored vrednosti proračunatih prema napred navedenim normama, na dijagramu su i vrednosti prema britanskim propisima koji su prethodili Evrokodu. Sa dijagrama se vidi da američki propisi daju nosivost veću za 20-25%, dok vrednosti dobijene po ostalim normama međusobno mnogo ne odstupaju.

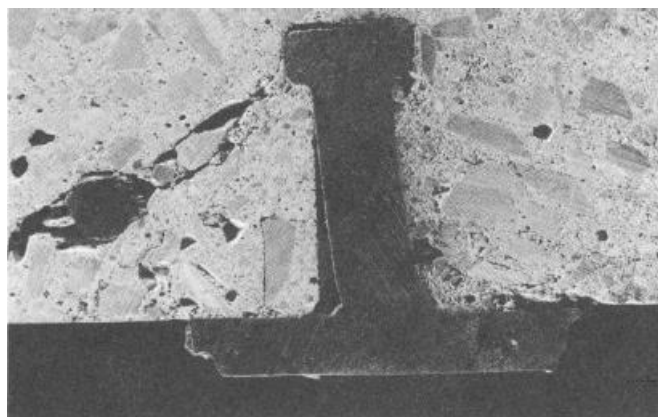
## 2.2.2 Istraživanja u oblasti zavarenih moždanika sa glavom opterećenih na smicanje

Kao što je ranije navedeno, istraživanja u ovoj oblasti su dugotrajna i veoma obimna, pa će ovde biti prikazana ona značajnija i aktuelnija.

[Ollgaard et al., 1971] su sproveli eksperimentalno istraživanje na 16 serija od po tri uzorka, "push-out" testom, u cilju određivanja nosivosti i dijagrama sila pomeranje za zavarene moždanike sa glavom pri smicanju. Varirana je čvrstoća betona, modul elastičnosti i zapreminska težina betona (lakoagregatni i običan beton), broj redova moždanika (jedan ili dva) i prečnik moždanika (slika 2.2).



**Slika 2.2** Dispozicija uzorka i karakterističan lom na smicanje moždanika (A2) i lom po betonu (C3) [Ollgaard et al., 1971]

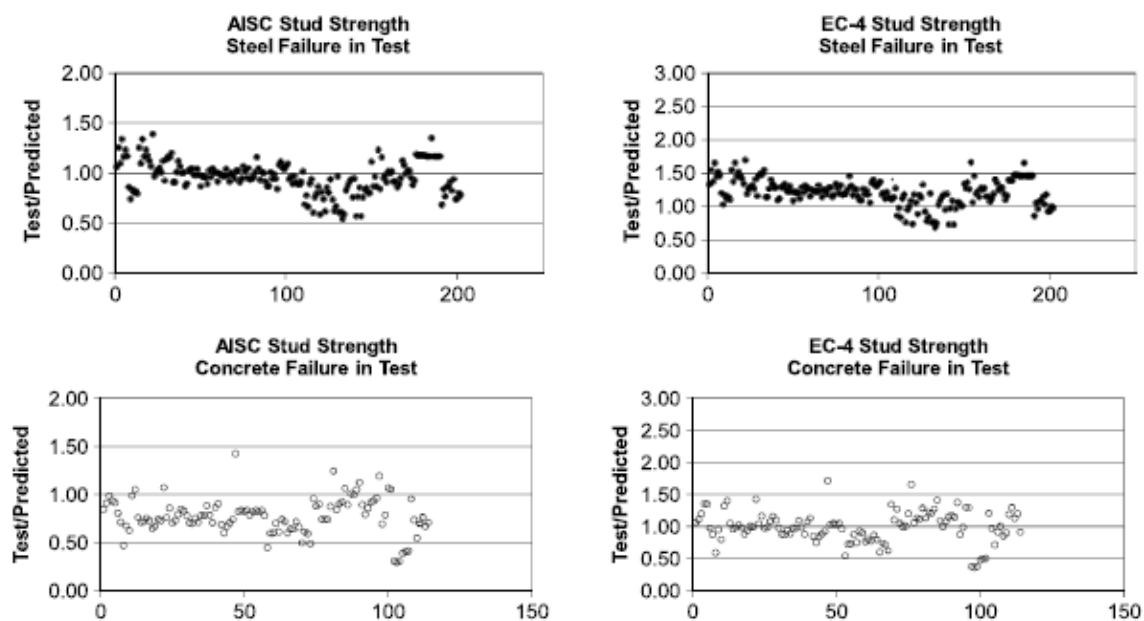


**Slika 2.3** Detalj moždanika i okolnog betona [Ollgaard et al., 1971]



Na slici 2.3 prikazan je detalj moždanika i okolnog betona moždanika posle dostizanja graničnog stanja, dobijen prosecanjem uzorka. Može se uočiti deformacija moždanika, mrvljenje betona ispred moždanika, i karakteristična prslina u betonu iza moždanika, koja se pruža od njegove glave prema ivici betona pod uglom od 45°. Rezultat ovog istraživanja, pored zaključka da vrsta primenjenog agregata (normalan ili laki) i broj redova moždanika značajno ne utiču na ponašanje veze, prodložen izraz za nosivost moždanika (2.5), koji je prihvaćen od strane Američkog instituta za čelične konstrukcije (AISC).

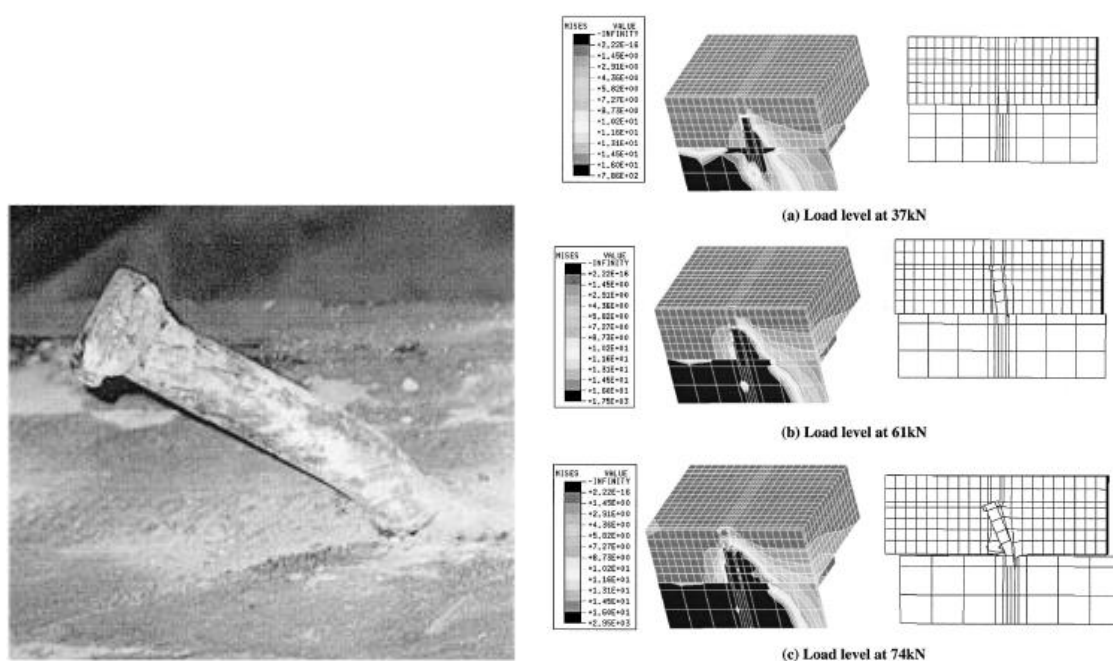
[Oehlers, 1980] je na 79 uzoraka vršio ispitivanja "push-out" testom u cilju određivanja uticaja pojedinih parametra na nosivost zavarenog moždanika na smicanje. Razmatran je uticaj krutosti (modula elastičnosti) betona, odnosa visine i prečnika moždanika, odnosa visine "kragne" i prečnika moždanika, čvrstoće betona pri pritisku. Pored eksperimentalnih ispitivanja, sprovedena je detaljna numerička analiza, na osnovu čega je dat doprinos razumevanju lokalnog naprezanja u betonu ispod korena moždanika i uticaja tog naprezanja na granično stanje nosivosti moždanika. Razmatran je i uticaj transversalne armature u okolini moždanika i pokazan njen znemariv doprinos na nosivost betona neposredno ispred moždanika.



**Slika 2.4** Relativna nosivost testiranih vrednosti u odnosu na AISC i EC za lom po čeliku (gornji red) i lom po betonu (donji red) [Pallarés and Hajjar, 2010]

Veoma obiman i sadržajan pregledni rad su dali [Pallarés and Hajjar, 2010], baziran na obradi 391-og testa nosivosti zavrenih moždanika. Ovako sistematizovani rezultati su upoređeni sa odgovarajućim vrednostima koje propisuju AISC 2005, EC-4, ACI 318-08 I PCI. Na slici 2.4 su, kao ilustracija, prikazani odnosi nosivosti dobijene eksperimentom i nosivosti koju propisuju AISC i EC. Prikazani odnosi ukazuju da [EC4, 2004] daje konzervativne rezultate kada su u pitanju i lom počeliku i lom po betonu. Značajan je i zaključak da, ukoliko je u pitanju beton sa normalnim agregatom, za odnose  $h/d > 5$  može se smatrati da neće doći do loma po betonu, a za lakoagregatni beton je to  $h/d > 7$ .

[Lam and El-Lobody, 2005] su, pored eksperimentalnog dela istraživanja standardnim "push-out" testom, izradili nelinearni numerički model primenom konačnih elemenata (slika 2.5).

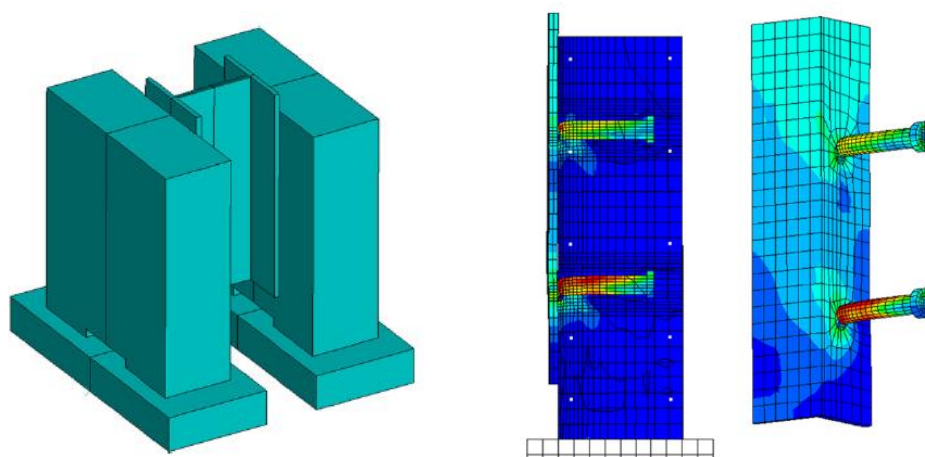


**Slika 2.5** Eksperimentalni i numerički model [Lam and El-Lobody, 2005]

[Nguyen and Kim, 2009] su izradili 32 nelinearna numerička modela u programu ABAQUS, prema postojećim istraživanjima "push-out" testovima (slika 2.6)

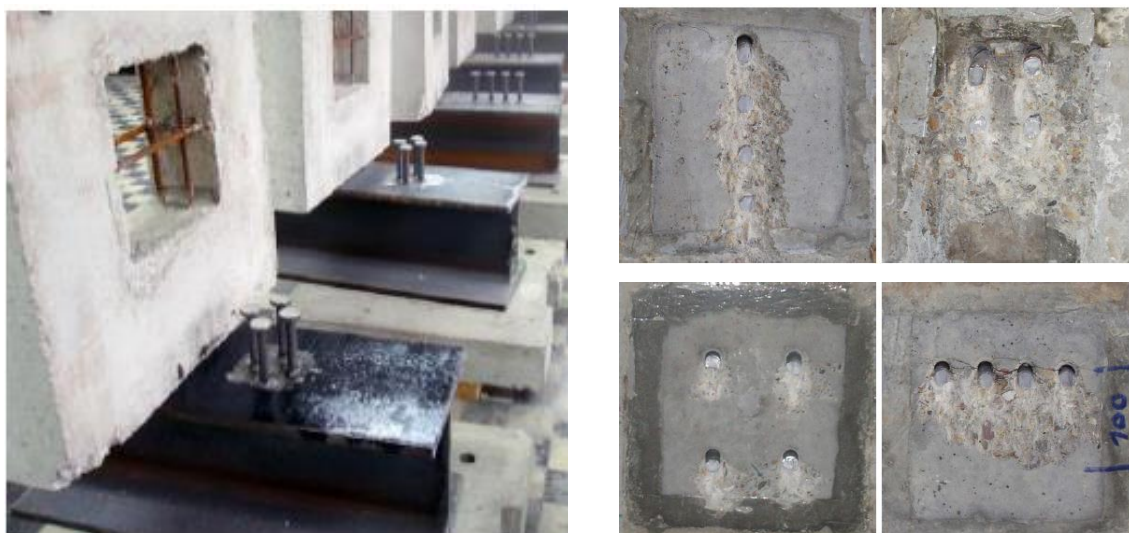
Ovo se modeliranje odnosilo na moždanike većih prečnika (25, 27 i 30 mm). Upoređenje sa nosivostima koje propisuju norme, između ostalog, je pokazalo da je EC na strani sigurnosti, ali da je to manje izraženo pri većim prečnicima i većim čvrstoćama betona.

[Hällmark, 2012] je objavio obimnu studiju o spregnutim mostovima sa prefabrikovanim betonskim pločama, u kojoj posebno mesto zauzima sprezanje čelika i betona konektorima koji su grupisani na mestima spojeva ploča. Sve češća primena ovakve tehnologije izrade spregnutih mostova, koja se pokazala tehnološki povoljnom i isplativom, pokrenula je veći broj istraživanja moždanika raspoređenih u grupe, sa ciljem da se utvrdi uticaj manjih rastojanja između moždanika na njihovo ponašanje i nosivost [Okada et al., 2006], [Shim et al., 2008].



**Slika 2.6** ABAQUS model "push-out" testa [Nguyen and Kim, 2009]

Eksperimentalno i nelinearno numeričko modeliranje grupa zavarenih moždanika sa glavom, prečnika 16 mm, grupisanih na različite načine sproveli su [Spremić et al., 2013].



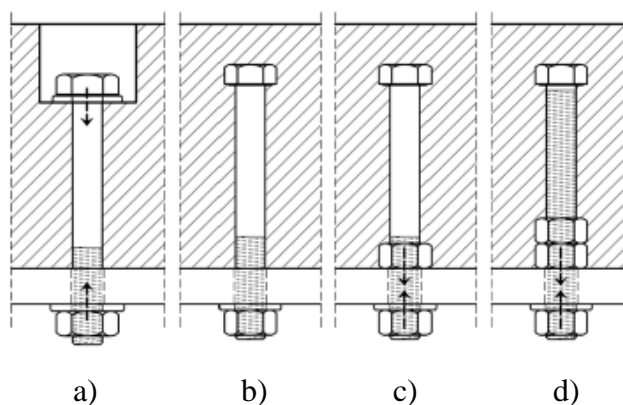
**Slika 2.6** Eksperimentalno ispitivanje grupe moždanika [Spremić et al., 2013]

Ispitivane su grupe od po 4 moždanika, raspoređenih u kvadratnu, rombičnu i linijsku horizontalnu i vertikalnu formu (slika 2.7). Sve ispitivane serije su lom dostigle smicanjem moždanika. Neki od osnovnih zaključaka ovog istraživanja su da, kod moždanika postavljenih u liniju upravno na pravac sile, kao i kvadratnih grupa, nosivost grupe se praktično ne razlikuje od zbira nosivosti pojedinih moždanika. Kod grupe od četiri moždanika postavljenih u liniju u pravcu dejstva sile, na razmaku manjem od  $3d$ , nosivost grupe iznosi 92% zbira pojedinačnih nosivosti.

### 2.3 Ugrađeni zavrtnjevi

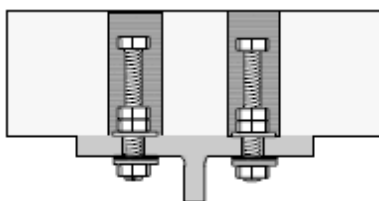
Zavrtnjevi, kao elementi veze čeličnog i armiranobetonskog elementa, mogu biti prethodno ugrađeni u prefabrikovane armiranobetonske elemente, a zatim povezani kroz, po istom šablonu, izbušene rupe na čeličnim elementima, ili naknadno, betoniranjem armiranobetonskih elementa preko zavrtnjeva montiranih na čelični profil. Naknadno ugrađivanje je moguće i lokalno, na mestima spoja montažnih armiranobetonskih ploča, u kom slučaju se zavrtnjevi grupišu.

Na slici 2.7 prikazani su različiti tipovi zavrtnjeva kao smičućih konektora: sa silom pritezanja a), bez ugrađene matice b), sa jednom ugrađenom maticom c) i dve ugrađene matice d). U slučajevima kada postoje ugrađene matice, zavrtnji sa čelikom mogu biti spojeni sa ili bez sile pritezanja.



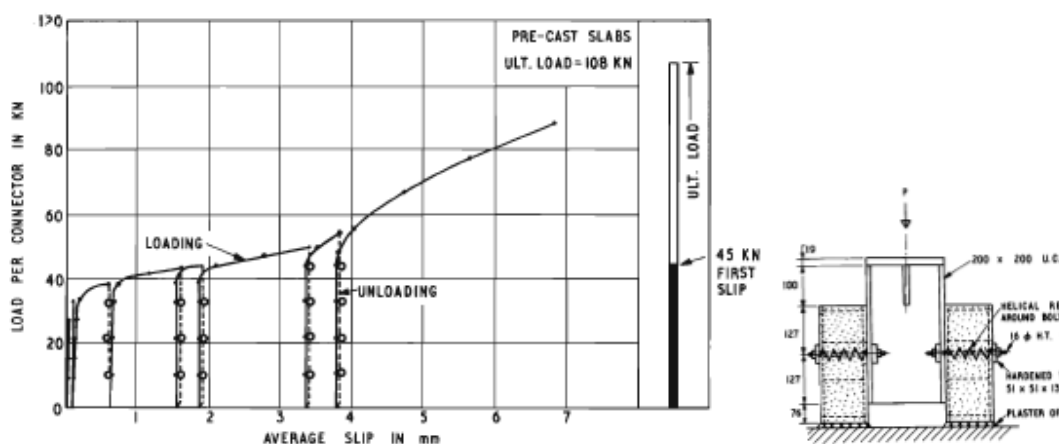
**Slika 2.7** Zavrtnjevi kao smičući konektori [Pavlović, 2014]

Naknadno ugrađeni zavrtnji se mogu primeniti kod naknadnog sprezanja čelične grede i armiranobetonske ploče, što može biti način ojačanja starijih mostova kod kojih je ploča prvobitno izvedena bez sprezanja sa čelikom [Kwon, 2008].



**Slika 2.8** Naknadno sprežanje zavrtnjevima [Kwon, 2008]

Među prvima je ispitivanja zavrtnjeva kao smičućih konektora sa silom pritezanja sproveo [Dallam, 1968]. [Marshall et al., 1971] Sproveli su ispitivanje zavrtnjeva sa silom pritezanja na standardnom "push-out" testu, kao i na modelima spregnutih greda. Testom su ispitivani zavrtnjevi prečnika 16mm, sa silom pritezanja 81.4 do 105 kN. Merena je sila pri prvom proklizavanju, a zatim sila loma. Na slici 2.9 prikazan je dijagram sila pomeranje, na kome se vidi da posle inicijalnog savlađivanja trenja ("first slip"), naknadnim opterećenjem se dobija dvostruko veća sila loma. Koeficijent trenja se kretao od 0.504 do 0.613 za betonske elemente betonirane na licu mesta, a 0.470 do 0.479 za prefabrikovane elemente.



**Slika 2.9** Naknado sprežanje zavrtnjevima [Marshall et al., 1971]

Kod sprežanja frikcionim zavrtnjevima sa silom pritezanja, nosivost spoja na trenje treba da bude veća od eksploatacionih napona smicanja, kako to i propisuje [GB50010, 2002], sa preporučenim koeficijentom trenja od 0.45.

Zavrtnjeve bez ubetonirane matice su ispitivali [Hawkins, 1987] i [Lam et al., 2013]. Ispitivanja su pokazala sličnu ili nešto nižu nosivost u odnosu na ogovarajuće zavarene moždanike, ali značajno manju krutost. Manja krutost je očekivana posledica razlike u načinu veze konektora i čeličnog profila. Kod zavarenog moždanika veza je kruta, a kod zavrtnja bez ubetonirane matice, moguće je značajno obrtanje zavrtnja u odnosu na čelični profil na mestu veze.

Ubetoniravanje jedne ili dve matice odmah uz flanšu profila, sa ili bez sile pritezanja, smanjuje obrtanje na spoju sa čelikom i time doprinosi krutosti ovakvog smičućeg konektora.

Prva ispitivanja zavrtnjeva sa ubetoniranom maticom sproveli su [Dedic and Klaiber, 1984] za naknadno ugrađene spojeve, za tip veze prikazan na slici 2.8. Između ostalih, ova ispitivanja je nastavio [Kwon, 2008]. Ispitivanja su vršena pomoću jednostranog smičućeg testa (slika 2.10). Paralelno sa ovakvim tipom veze, ispitivani su i prednapregnuti frikcionni spojevi zavrtnjevima, kao odgovarajući athezioni ankeri.



**Slika 2.10** Jednostrani smičići test [Kwon, 2008]

Ispitivanja su pokazala da ovakvi zavrtnjevi imaju slično ponašanje i nosivost kao i zavreni moždanici sa glavom i bolju otpornost na zamor, jer nema zavarivanja.

Veoma detaljno istraživanje zavrtnjeva sa ubetoniranom glavom sproveo je [Pavlović, 2014]. Istraživanje je obuhvatilo eksperimentalno ispitivanje standardnim "push-out" testom dve serije uzoraka sa po četiri zavrtnja, prva sa zavrtnjevima M16, a druga M20, obe grupe klase 8.8 (slika 2.11)

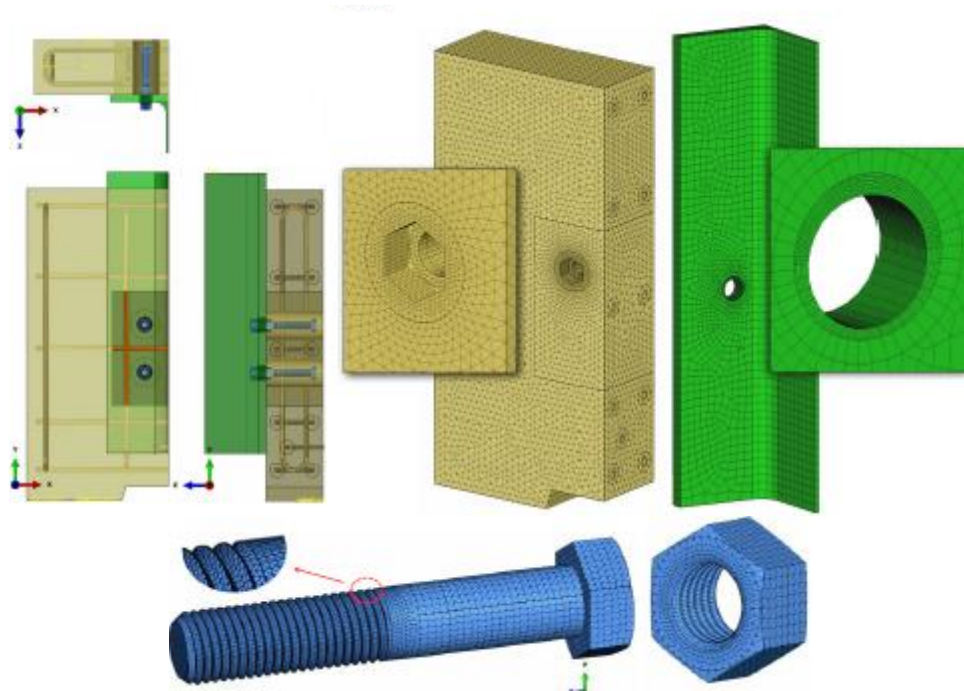


**Slika 2.11** Priprema uzoraka sa smičućom vezom zavrtnjima [Pavlović, 2014]

Drugi deo istraživanja obuhvatio je numeričku analizu ove veze pomoću nelinearnog numeričkog modela u programu ABAQUS (slika 2.12). Nakon kalibracije

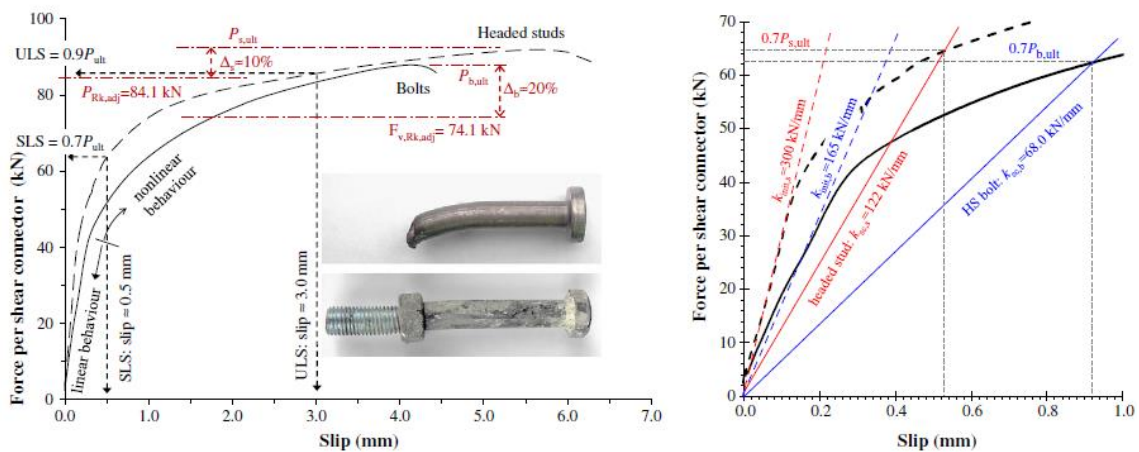


modela prema izvršenim eksperimentalnim ispitivanjima usledila je parametarska analiza, gde su prethodnom analizom određeni relevantni parametri, a zatim detaljno analiziran uticaj prečnika i visine zavrtnja, kao i čvrstoće betona.



**Slika 2.12** Detalji numeičkog modela u ABAQUS-u [Pavlović, 2014]

U okviru ovog istraživanja [Pavlović et al., 2014] su sproveli uporednu analizu ponašanja i nosivosti zavrtnjeva M16 u smičućoj vezi sa odgovarajućim zavarenim moždanicima prečnika 16 mm, prema rezultatima istraživanja koje je izvršio [Spremić, 2013]. Ovo upoređenje je prikazano na dijagramu na slici 2.13.



**Slika 2.13** Upoređenje ponašanja i nosivosti smičuće veze zavrtnjem sa jednom ubetoniranom maticom i zavarenim moždanikom sa glavom [Pavlović et al., 2014]

Nosivost zavrtnja sa jednom ubetoniranom maticom kao smičućeg konektora je, u konkretnom slučaju, oko 95% od nosivosti moždanika. Zavrtnjevi pokazuju manju inicijalnu krutost usled zazora rupe u čeličnom elementu u odnosu na prečnik zavrtnja. Takođe se može uočiti da zavrtnjevi ranije prelaze u nelinearnu oblast dijagrama sila pomeranje, što je posledica usecanja navoja zavrtnja u čelični profil u zoni rupe, kao i smanjene nosivosti pritisnutog betona ispred ubetonurane matice usled različitih efekata bočnog utezanja betona u ovoj zoni kod dva posmatrana konektora. Maksimalno pomeranje zavrtnja pri lomu je manje od pomeranja moždanika, iznosi oko 4 mm, i time, prema [EC4, 2004], ovakvu vezu svrstava u neduktilnu. Ovo je posledica načina prenošenja smicanja u zoni flanše čeličnog elementa "zaglavljivanjem" matice u površinu flanše. Veoma detaljan model prenosa sile smicanja kroz vezu zavrtnjem sa ubetoniranom maticom, koji je pokazao [Pavlović, 2014], biće šire razmatran u poglavlju 6.

## **2.4 Naknadno ugrađeni – bušeni ankeri**

Osnovni tipovi naknadno ugrađenih bušenih ankera su prikazani na slici 1.5. Ponašanje ovakvih ankera, kada se smičuće opterećenje prenosi preko čelične ploče postavljene na površinu betona, može uporediti sa ponašanjem, pre svega, ubetoniranim zavrtnjeva bez matica, kao i onih sa jednom ubetoniranom maticom. S jedne strane, konektori sa armaturnom spojnicom, koji su predmet ove teze, mogu se svrstati i u grupu sa ubetoniranim zavrtnjima, zbog veze sa čelikom preko zavrtnja, i delovanja spojnice kao produžene matice. Sa druge strane, imaju relativno dubok i fleksibilan anker, kao i bušeni ankeri, pa sledi da i rezultati prethodnih istraživanja bušenih ankera svakako mogu biti od koristi.

### **2.4.1 Istraživanja u oblasti naknadno ugrađenih ili bušenih ankera opterećenih na smicanje**

Istraživanja naknadno ugrađenih ili bušenih ankera su obimna i mogu se, generalno podeliti u dve grupe: istraživanja ankera opterećenih na zatezanje i ankera opterećenih na smicanje. U obe grupe, a pogotovo kod smicanja, istraživanja su, poslednjih godina, u velikoj meri, koncentrisana na uticaj blizine ivice betonskog elementa na ponašanje i nosivost ovih ankera. I ovde se izdvajaju dve grupe istraživanja: prva, ponašanje i nosivost ankera ili grupa ankera opterećenih na smicanje



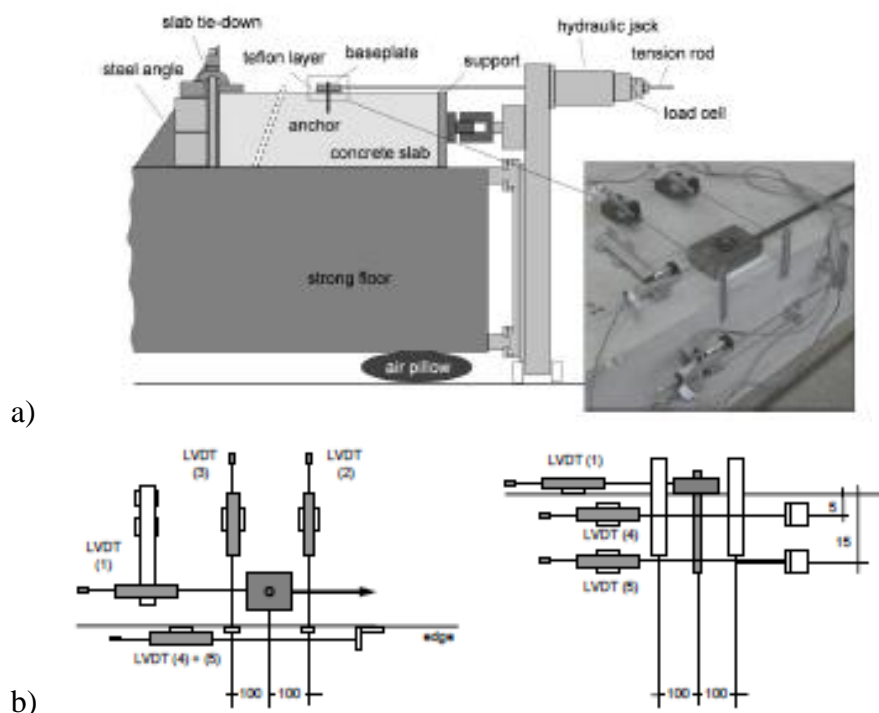
upravno na ivicu betona i, druga, ponašanje i nosivost ankera ili grupa ankera opterećenih paralelno sa ivicom. S obzirom da su konektori sa mehaničkom spojnicim, koji su u okviru ove teze ispitivani, ugrađeni u AB prizme relativno blizu ivice preseka (75 do 150 mm od ivice, prema dispoziciji ispitivanja u narednom poglavlju), ovde će se razmatrati prethodna istraživanja u oblasti naknadno ugrađenih ili bušenih ankera opterećenih na smicanje paralelno sa ivicom.

U pomenutoj se oblasti posebno ističe istraživanje koje je obavio [Grosser, 2012]. Radi se o kombinaciji iscrpnog preglednog rada o dosadašnjim istraživanjima naknadno ugrađenih ili bušenih ankera, zatim širokog i sveobuhvatnog eksperimentalnog istraživanja na 118 uzoraka, koje je autor sproveo u periodu 2007 – 2011. Rad sadrži i nelinearno numeričko modeliranje, kao i detaljne analize sa predloženim novim konceptom generisnja i prenošenja lokalnih opterećenja na beton kod ankera opterećenih na smicanje u blizini ivice, sa odgovarajućim relativno jednostavnim modelom za proračun, koji predstavlja poboljšanje postojećeg u važećoj regulativi. Pomenutim istraživanjem su obuhvaćena naprezanja ankera i grupa ankera u blizini ivice na zatezanje, smicanje u oba pravca i torziju, a ovde će biti prikazani osnovni aspekti istraživanja ankera u blizini ivice, opterećenih paralelno sa ivicom.

[Grosser, 2012], u preglednom delu rada, navodi da su istraživanja ankera opterećenih na smicanje relativno malobrojna, i ističe rezultate istraživanja koje su sproveli *The Dutch Foundation for Building Research (1971)*, zatim *Hofmann, 2005*, i *Anderson and Meinheit, 2006*. Navedena istraživanja su rezultovala proračunskim modelima koji su prikazani u tabeli 2.1.

Eksperimentalna istraživanja u ovoj oblasti, koje je sproveo [Grosser, 2012], odnose se na bušene ankere sa prijanjanjem pomoću atezivne ispune, prečnika M12, M16, M20 i M24, klase 10.9. Rastojanja od ivice betona do ankera  $c_1$  je bilo u granicama od 45 do 200 mm. Čvrstoće betona na pritisak, merene u trenutku ispitivanja su se kretale u granicama od 22.6 do 32.5MPa. Betonske prizme su minimalno podužno armirane, bez armature za uteženje.

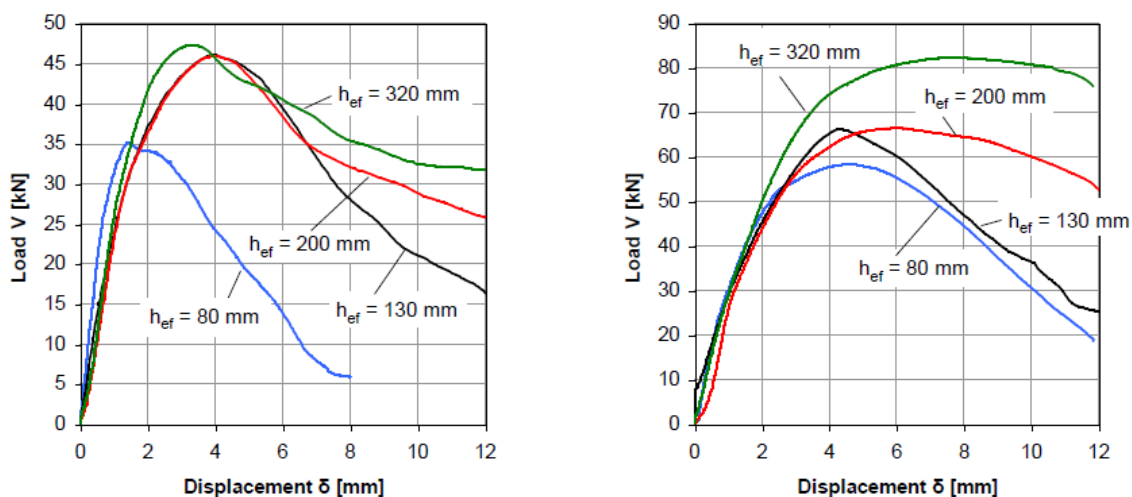
Dispozicija ispitivanja, u formi jednostranog smičućeg testa je prikazana na slici 2.14.



**Slika 2.14** Dispozicija uzorka a), sa rasporedom mernih mesta b) [Grosser, 2012]

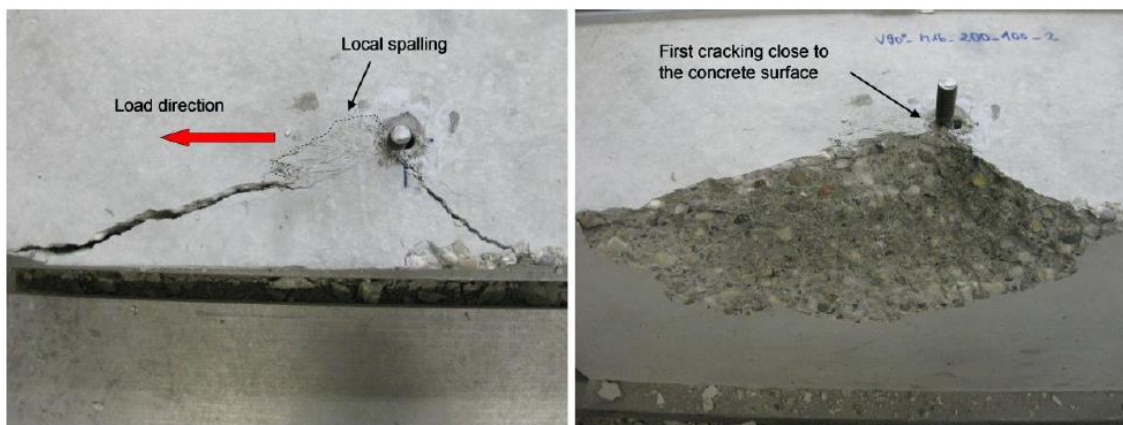
Induktorm LVDT (1) mereno je relativno pomeranje čelične ploče i betona ("slip"), induktorima (2) i (3) otvor prsline ispred i iza ankera na gornjoj površini betona, a induktorima (4) i (5) to isto, ali sa bočne strane betonske prizme.

Na slici 2.15 prikazane su karakteristične krive sila pomeranje za anker M16, udaljen od ivice betona  $c_f=50$  mm (na slici levo) i  $c_f=100$  mm (na slici desno).



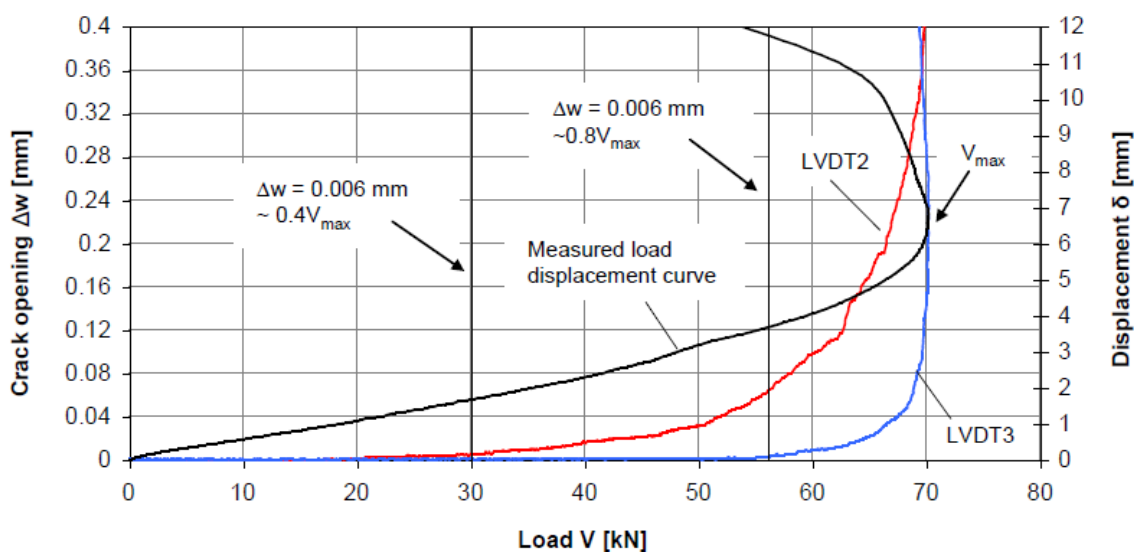
**Slika 2.15** Karakteristični dijagram sila - pomeranje [Grosser, 2012]

Na slici 2.16 prikazan je raspored pukotina na uzorku posle ispitivanja do loma (slika levo), kao i uzorak posle uklanjanja odvaljenog dela betona (slika desno). Karakterističan je različiti nagib pukotina ispred i iza ankera.



**Slika 2.16** Uzorak posle ispitivanja [Grosser, 2012]

Na osnovu merenja induktorima LVDT (2) – (5) (slika 2.14) formirani su dijagrami razvoja prsline ispred i iza ankera u funkciji prirasta opterećenja, što je prikazano na grafiku (slika 2.17).



**Slika 2.17** Razvoj ispred i iza ankera (M16,  $c_I=100\text{mm}$ ) [Grosser, 2012]

Linija prsline ispred ankera (LVDT (2), crvena linija) pokazuje veći otvor prsline nego iza ankera (LVDT (3), plava linija). Na dijagramu je prikazana i kriva pomeranje – sila (crna linija). Utvrđeno da induktori počinju da se pomeraju na oko 0.006mm, što je usvojeno za početak otvaranja prsline. Sa dijagrama se vidi prsline ispred ankera počinje da se otvara na oko 40% od maksimalne sile loma, a prsline iza ankera na oko 80% iste sile. Otvor prsline pri lomu zavisi od odnosa dubine i prečnika ankera. Pokazuje se da je osrednjeni konačni otvor prsline ispred ankera oko 3.5 puta veći nego iza ankera. U apsolutnom iznosu vrednosti otvora prsline ispred ankera variraju u granicama od 0.2 do 3.5mm (standardna devijacija do 240%).

[Grosser, 2012] je ispitivao i elemente male širine ( tzv. "uzani" elementi) sa jednim ili dva ankera u blizini ivice betona. Uzorak sa dva ankera, koji odgovara dispoziciji uzoraka ispitivanih u okviru ove teze (poglavlje 3), prikazan je na slici 2.18



**Slika 2.18** Dispozicija ispitivanja ankera u elementima male širine [Grosser, 2012]

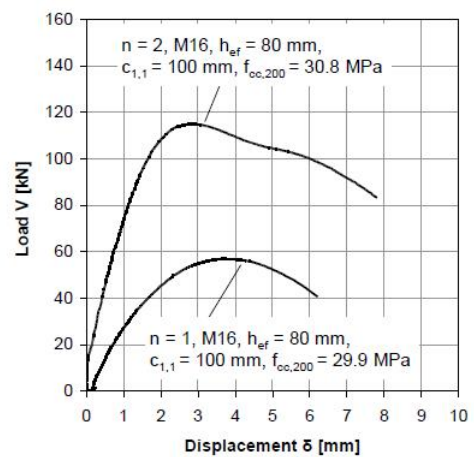
Rezultat ispitivanja ankera u uzanim elementima, koji po obliku odgovaraju stubovima, prikazan je na slici 2.19, i to za anker M16, dubine 80 mm, udaljen od ivice betona  $c_l=100\text{mm}$



(a)  $n = 2, M16, h_{ef} = 80 \text{ mm}, c_{l,1} = 100 \text{ mm}$



(b)  $n = 1, M16, h_{ef} = 80 \text{ mm}, c_{l,1} = 100 \text{ mm}$

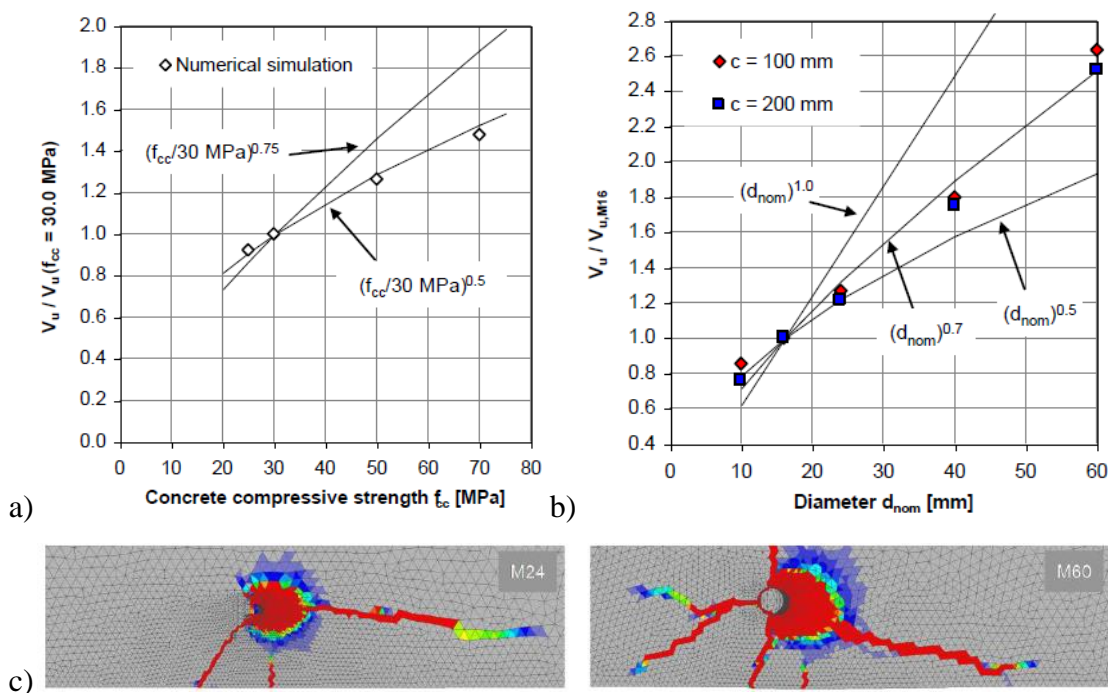


(c)

**Slika 2.19** Ponašanje i nosivost ankera u element male širine [Grosser, 2012]

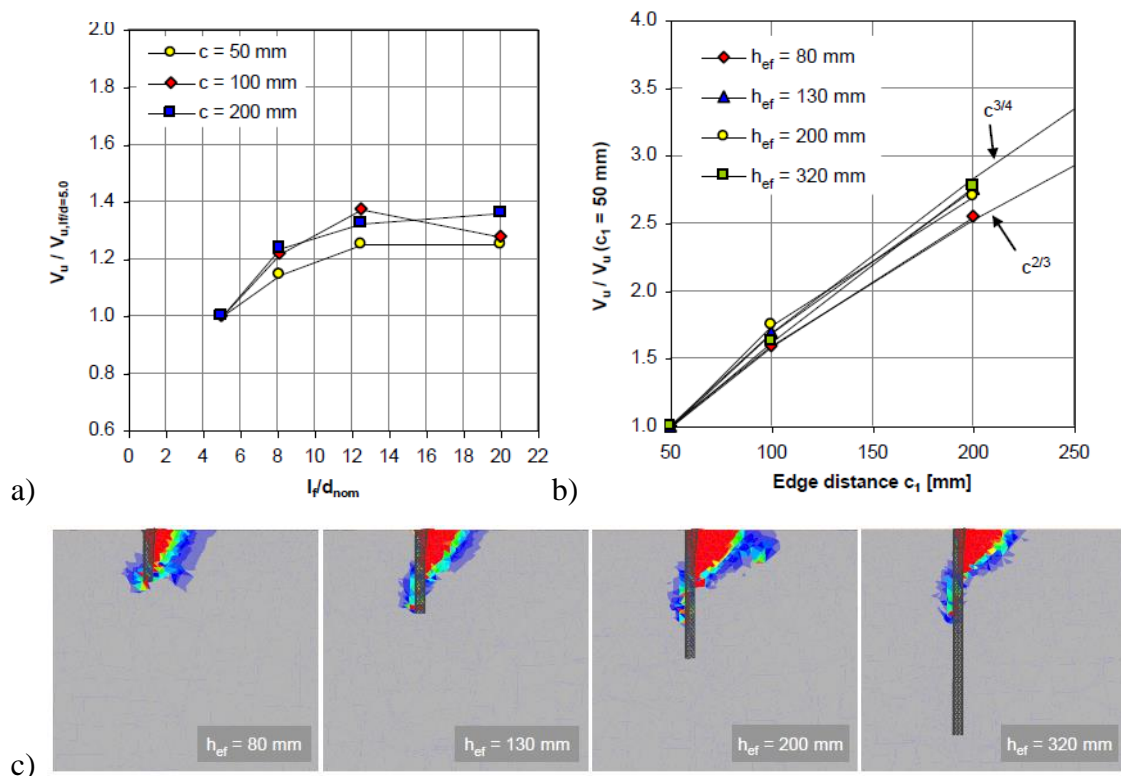
. Na slici 2.19a prikazan je uzorak sa dva simetrično postavljena ankera u odnosu na podužnu osu stuba, a na slici 2.19b je uzorak sa jednim ankerom. Na grafiku na istoj slici su prikazane krive sila – pomeranje za oba slučaja. On pokazuje da je nosivost dva ankera praktično dvostruka vrednost pojedinačne nosivosti.

Numeričko modeliranje [Grosser, 2012] je sproveo pomoću programa za proračun konačnim elementima MASA (Macroscopic Space Analysis), uz pripremu modela u softveru FEMAP. Za pojedinačne ankere u blizini ivice opterećene na smicanje paralelno sa ivicom, sprovedena je parametarska analiza, variranjem čvrstoće pri pritisku betona (slika 2.20a), prečnika ankera (slika 2.20b), odnosa efektivne dubine i spoljnog prečnika ankera ( $l_f/d_{nom}$ ) (slika 2.21a) i rastojanja ankera od ivice elementa  $c_l$  (slika 2.21b). Na slikama su prikazane linije koje prikazuju analitičke krive proporcionalnosti prirasta nosivosti u funkciji od variranih parametara. Pokazuje se da prirast nosivosti u funkciji od čvrstoće najbolje opisuje funkcija  $(f_{cc,200})^{0.5}$ , gde je  $f_{cc,200}$  čvrstoća pri pritisku kocke stranice 200 mm. Što se prečnika ankera tiče, prirast nosivosti najbolje opisuje funkcija  $(d_{nom})^{0.7}$ , a krive  $c_l^{2/3}$  i  $c_l^{3/4}$  predstavljaju donju i gornju granicu uticaja rastojanja ankera od ivice preseka na nosivost ankera.



**Slika 2.20** Nosivost u funkciji čvrstoće betona i prečnika [Grosser, 2012]





**Slika 2.21** Nosivost u funkciji odnosa  $l_f/d_{nom}$  i rastojanja od ivice  $c_1$  [Grosser, 2012]

Na slici 2.20c prikazana je slika prslina pri dostizanju sile loma za ankere prečnika M24 i M60, a na slici 2.21c razvoj oštećenja po dubini betona za različite visine efektivne dubine ugradnje  $h_{ef}$ , kod ankera M16 udaljenog 100 mm od ivice betona.

[Grosser, 2012] daje pregled različitih modela za proračun nosivosti pri lomu usled blizine ivice betona za ankere opterećene na smicanje paralelno sa ivicom (tabela 2.1). Preko izraza u tabeli 2.1, označenih od (1) do (8), dobijene su vrednosti računске nosivosti  $V_{u,prediction}$ , a zatim prikazan odnos merene vrednosti  $V_{u,test}$  i računске nosivosti u funkciji od parametara a) rastojanje od ivice  $c_1$ , b) prečnik  $d_{nom}$ , c) dubine ankera  $h_{ef}$  i d) odnosa  $h_{ef}/d_{nom}$  ( $h_{ef}$  i  $d_{nom}$  su definisani na slici 2.23).

**Tabela 2.1** Nosivost pri lomu usled blizine ivice betona, za opterećenje paralelno sa ivicom [Grosser, 2012]

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | $V_{u,c} = (1.8 + 0.9f_{cc,200}) \cdot (4 \cdot c_1^2 \cdot h^2) / (4 \cdot c_1^2 + h^2)$   | The Dutch Foundation for Building Research (1971) |
| 2 | $V_{u,c} = 2.0 \cdot \sqrt{d} \cdot (l_f/d)^{0.2} \cdot \sqrt{f_{cc,200}} \cdot c_1^{1.5}$  | [ACI-318-08 (2008)]                               |
| 3 | $V_{u,c}^0 = 3.0 \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{cc,200}} \cdot c_1^{1.5}$ ,<br>gde je: $\alpha = 0.1 \cdot (l_f/c_1)^{0.5}$ , $\beta = 0.1 \cdot (d_{nom}/c_1)^{0.2}$<br>$\psi_{90^\circ,V} = 20 \cdot \left( \frac{n \cdot d_{nom} \cdot f_{cc,200}}{V_{u,c}^0} \right)^{0.5} \leq 5.0$ , $V_{u,c} = \psi_{90^\circ,V} \cdot V_{u,c}^0$ | Hofmann (2005)                                    |
| 4 | $V_{u,c} = 7.5 \cdot d^{0.1(l_f/c_1)^{0.5}} \cdot l_f^{0.1(d/c_1)^{0.2}} \cdot \sqrt{f_{cc,200}} \cdot c_1^{1.5}$   | [CEN/TS 2, 2009]                                  |
| 5 | $V_{u,c} = 6.51 \cdot c^{4/3} \cdot d^{0.75} \cdot \sqrt{f_{cc,200}}$   | Anderson and Meinheit (2006)                      |
| 6 | kao pod 3, osim:<br>$\psi_{90^\circ,V} = 2.50 / (1 - d_{nom}/(2c_1))$   | Mallée, P. W. (2007)                              |
| 7 | kao pod 3, osim:<br>$\psi_{90^\circ,V} = 4.0 \cdot k_4 \cdot \left( \frac{n \cdot d_{nom}^2 \cdot f_{cc,200}}{V_{u,c}^0} \right)^{0.5} \leq 5.0$ , $k_4 =$<br>$\left. \begin{array}{l} \{1.0 \text{ za upasovane} \\ \{0.75 \text{ za neupasovane}\} \end{array} \right\}$  | [CEB-FIP, 2011]                                   |
| 8 | $V_{u,c} = 43 \cdot c^{2/3} \cdot \sqrt{f_{cc,200}} \cdot d \cdot (l_f/12d)^{0.3}$  | Grosser (2011)                                    |

gde je:

$d$  neto prečnik zavrtnja ili prečnik stabla moždanika

$d_{nom}$  spoljni prečnik ankera, sa ograničenjem  $d_{nom} \leq 60\text{mm}$  [CEB-FIP, 2011]

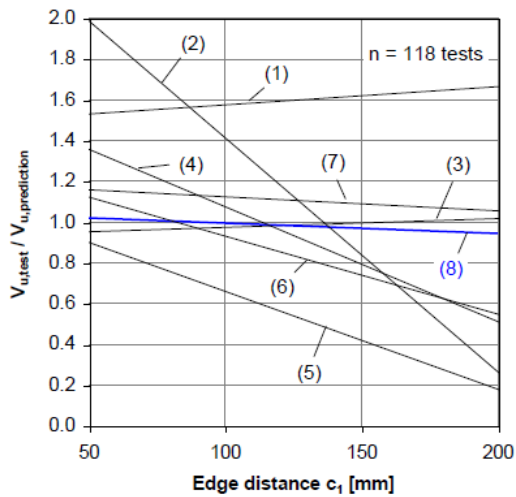
$h$  visina ankera (u ovom slučaju, u izrazu (1), jednaka debljini betona, jer ankeri prolaze kroz celu debljinu ploče)

$c, c_1$  rastojanje ankera od ivice betona

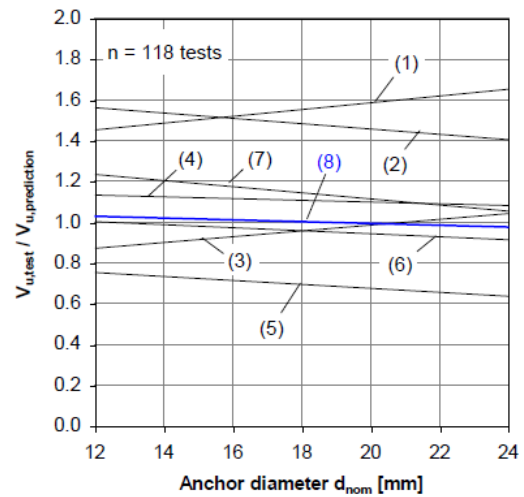
$l_f$  efektivna dužina ankera, sa ograničenjem:  $l_f \leq 12d_{nom}$  za  $d_{nom} \leq 24\text{mm}$  i  $l_f \leq 8d_{nom}$  za  $d_{nom} > 24\text{mm}$  [CEB-FIP, 2011]

$f_{cc,200}$  srednja čvrstoća na pritisak betona za kocku stranice 200mm

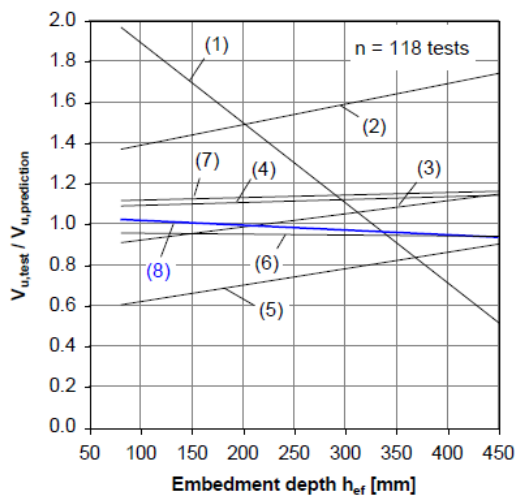
$n$  broj ankera u vezi



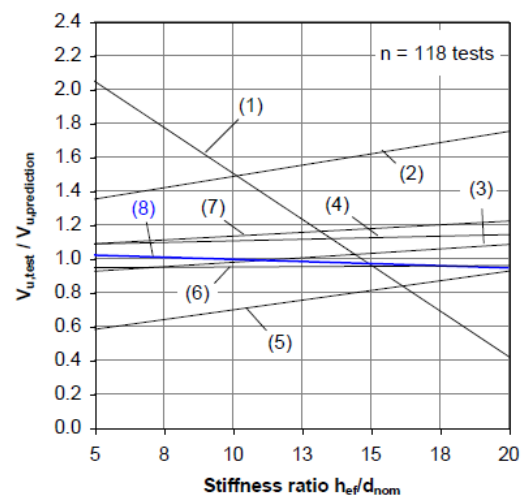
(a)



(b)



(c)

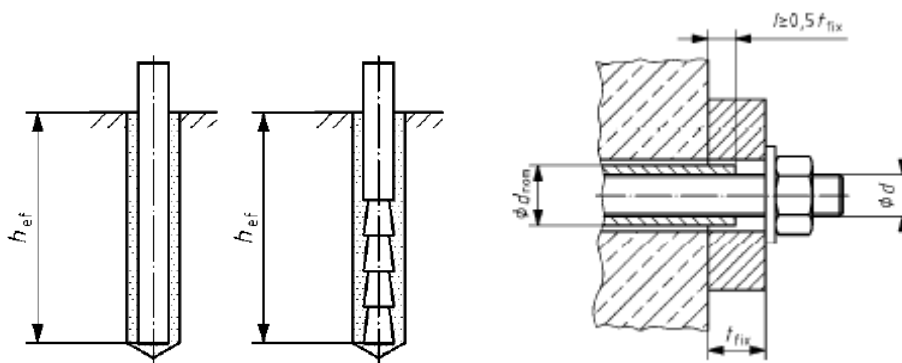


(d)

**Slika 2.22** Odnos merene i proračunate (tabela 2.1) nosivosti u funkciji: a)  $c_1$ , b)  $d_{nom}$ , c)  $h_{ef}$  i d) odnosa  $h_{ef}/d_{nom}$  [Grosser, 2012]

Sa dijagrama na slici 2.22 se može videti odlično poklapanje merenih i računskih vrednosti (linija (8), plave boje, za predlog izraza koji je dao [Grosser, 2012], na osnovu novog originalnog objašnjenja modela lokalnih naprezanja u betonu, u okolini ankera opterećenog na smicanje paralelno sa ivicom, a koji dovodi do loma usled blizine ivice betona. O ovom modelu će više reči biti u poglavlju 6 ove teze.





Slika 2.23 Definicija  $h_{ef}$  i  $d_{nom}$  kod bušenih ankeri [CEN/TS 1, 2009]

## 2.4.2 Nosivost na lom usled blizine ivice ankera opterećenih na smicanje paralelno sa ivicom

Važeće evropske norme u ovoj oblasti, CEN/TS 1992-4-2:2009 "Design of fastenings for use in concrete, Part 4-2: Headed Fasteners" [CEN/TS 2, 2009], definišu nosivost ankera u blizini ivice betona, opterećenog na smicanje paralelno sa ivicom, preko karakteristične vrednosti inicijalne nosivosti ankera opterećenog upravno na ivicu elementa, izraz (2.8):

$$V_{Rk,c}^0 = 1.6 \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot c_1^{1.5} \quad (2.8)$$

Koeficijenti  $\alpha$  i  $\beta$  definisani su irazima (2.9) i (2.10):

$$\alpha = 0.1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1}\right)^{0.5} \quad (2.9)$$

$$\beta = 0.1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1}\right)^{0.2} \quad (2.10)$$

gde je:

$f_{ck,cube}$  srednja čvrstoća na pritisak betona za kocku stranice 150mm,

$c_1$  rastojanje ankera od ivice betona

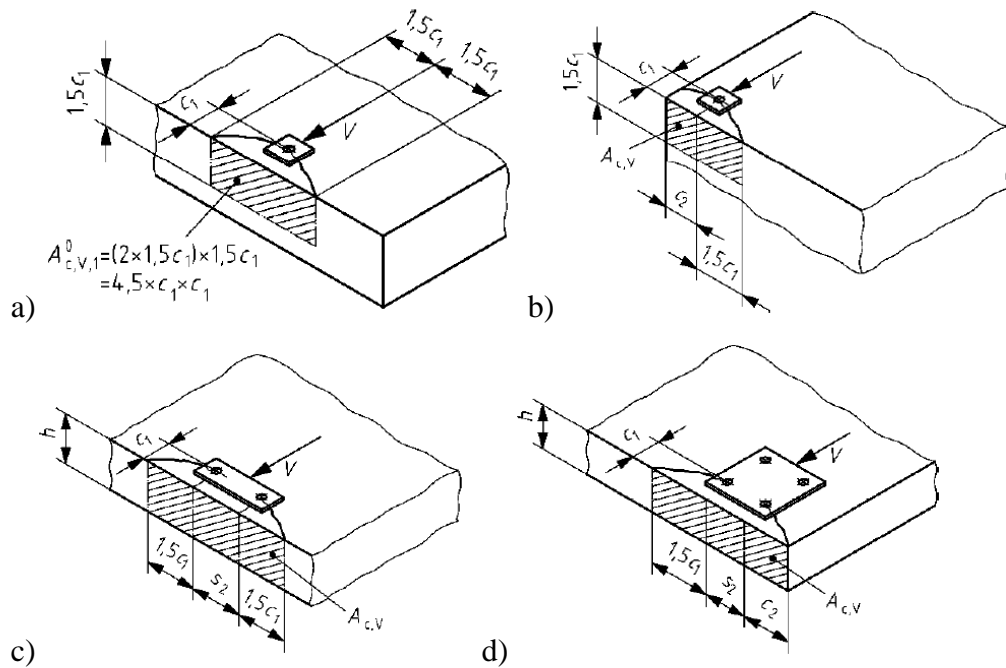
$l_f$  efektivna dužina ankera, sa ograničenjem:  $l_f \leq 8d_{nom}$

$d_{nom}$  spoljni prečnik ankera, sa ograničenjem  $d_{nom} \leq 60\text{mm}$

Karakteristična nosivost ankera, ili grupe ankera, data je izrazom (2.11):

$$V_{Rk,c} = V_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{h,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{re,V} \quad (2.11)$$

gde su površine  $A_{c,V}$  i  $A_{c,V}^0$  definisane na slici 2.24.



**Slika 2.24** Definicija površine  $A_{c,V}$  (b, c, d) i  $A_{c,V}^0$  (a) [CEN/TS 2, 2009]

Koeficijent  $\psi_{s,V}$  uvodi efekat blizine susedne, dalje ivice, preko rastojanja  $c_2$ , i od značaja je kod uzanih elemenata. Ovaj koeficijent je dat izrazom (2.12):

$$\psi_{s,V} = 0.7 + 0.3 \cdot \frac{c_2}{1.5c_1} \leq 1 \quad (2.12)$$

Koeficijent  $\psi_{h,V}$  uvodi efekat male debljine elementa  $h$ , i od značaja je kod tankih ploča. Ovaj koeficijent je dat izrazom (2.13):

$$\psi_{h,V} = \left( \frac{1.5c_1}{h} \right)^{0.5} \geq 1 \quad (2.13)$$

Koeficijent  $\psi_{ec,V}$  uvodi efekat ekscentriciteta sile u odnosu na anker ili težište grupe ankera  $e_V$ . Ovaj koeficijent je dat izrazom (2.14):

$$\psi_{ec,V} = \frac{1}{1 + 2 \cdot e_V / (3 \cdot c_1)} \leq 1 \quad (2.14)$$

Koeficijent  $\psi_{\alpha,V}$  uvodi efekat ugla  $\alpha_V$  pod kojim deluje sila na ivicu elementa. Ovaj koeficijent je dat izrazom (2.15):

$$\psi_{\alpha,V} = \sqrt{\frac{1}{(\cos \alpha_V)^2 + (0.4 \sin \alpha_V)}} \geq 1 \quad (2.15)$$

Koeficijent  $\psi_{re,V}$  uvodi efekat armature i pojave prslina u betonu. Ovaj koeficijent je dat izrazoma (2.16a-c):

$$\psi_{re,V} = 1.0 \quad \text{anker u ispucalom betonu bez ivične armature ili uzengija, (2.16a)}$$

$\psi_{re,V}=1.2$  anker u ispucalom betonu sa ivičnom armaturom ( $\geq \emptyset 12$ ), (2.16b)

$\psi_{re,V}=1.4$  anker u ispucalom betonu sa ivičnom armaturom i gusto postavljenim uzengijama sa razmakom  $a \leq 100\text{mm}$  i  $a \leq 2c_l$ , ili se anker nalazi u neispucalom betonu. (2.16c)

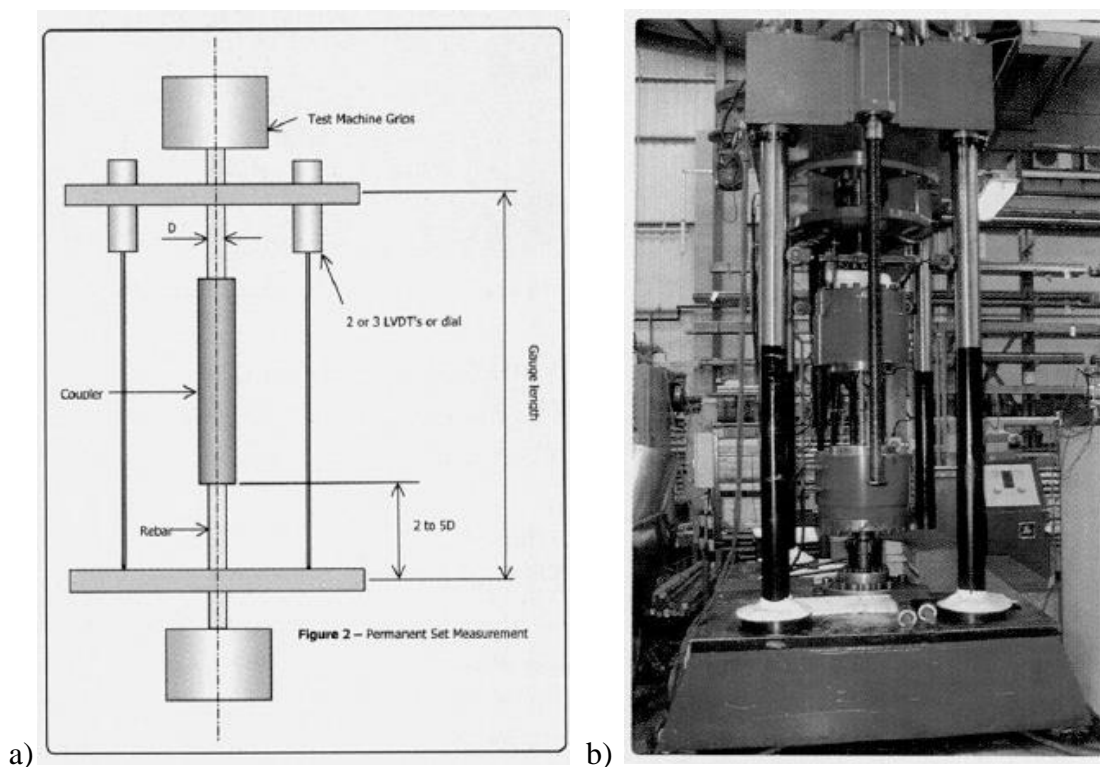
Za ankere koji su opterećeni paralelno sa ivicom betona, ugao  $\alpha_V$  iznosi  $90^\circ$ , pa je koeficijent  $\psi_{a,V} = 2.5$ . Za neisprskali beton sledi da je  $\psi_{re,V} = 1.4$ . Ukoliko je anker daleko od drugih ivica, u dovoljno debelom elementu, odnos površina  $A_{c,V}/A_{c,V}^0$  i svi ostali koeficijenti u izrazu (2.11) jednaki su jedinici. Ako je odnos karakteristične i srednje nosivosti izrazi kao  $V_{Rk,c} = 0.75V_{u,c}$ , na osnovu koeficijenta varijacije od 15% [CEB-FIP, 2011], dobija se izraz (2.17):

$$V_{u,c} = \frac{2.5}{0.75} \cdot 1.4 \cdot V_{Rk,c}^0 = 7.5 \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck,cube}} \cdot c_1^{1.5} \quad (2.17)$$

što predstavlja jednačinu pod brojem (4) u tabeli 2.1, u pregledu predloženih izraza za srednju nosivost ankera u blizini ivice, opterećenih paralelno sa ivicom elementa prema [Grosser, 2012].

## 2.5 Konektori sa mehaničkim spojnica

Mehaničke spojnice su, kao što je već rečeno u poglavlju 1, prevashodno namenjene nastavljanju armaturnih šipki. Razvijeni su različiti sistemi nastavljanja, i relativno je veliki broj proizvođača ovih spojnica kao komercijalnih patentiranih prizvoda. S obzirom da proizvođači potiču iz različitih zemalja, pa su i postavljeni zahtevi u vezi sa kvalitetom, mehaničkim karakteristikama i ponašanjem ovih spojnica bili različiti, kao i načini dokazivanja zahtevanih osobina. Ne tako davno, [Fallon, 2005] je ukazao na potrebu usvajanja jedinstvenog dokumenta koji bi definisao zahteve i način testiranja mehaničkih spojnica. U svom radu iznosi iskustva ispitivanja spojnica koje proizvodi britanska firma ANCON, prikazujući tipičnu dispoziciju za ispitivanje mehaničkih spojnica na statičko i dinamičko aksialno opterećenje kao i ciklično opterećenje na zamor (slika 2.25a), i aktuator koji se koristi za interna ispitivanja (slika 2.25b).



**Slika 2.25** Ispitivanje mehaničkih spojnica ANCON [Fallon, 2005]

U međuvremenu su usvojeni međunarodni standardi [ISO 15835-1, 2009] i [ISO 15835-2, 2009] koji se odnose na nastavljenje armature mehaničkim spojnicama. U prvom delu standarda [ISO 15835-1, 2009] definisani su zahtevi koje mehaničke spojnice moraju da ispune, a u drugom delu [ISO 15835-2, 2009] način ispitivanja. Propisani zahtevi za mehaničke spojnice odnose se na sledeće osobine:

*Čvrstoća i duktilnost pri statičkom opterećenju:* Čvrstoća mehaničkog nastavka mora biti najmanje jednaka proizvodu propisane gornje granice razvlačenja armature ( $R_{eH,spec}$ ) i odnosa stvarne i propisane vrednosti napona razvlačenja za armaturu ( $(R_m/R_{eH})_{spec}$ ). Ukupno izduženje pri najvećoj sili  $A_{gt}$  ne sme biti manje od 70% propisanog ukupnog izduženja pri maksimalnoj sili za armaturu, ali ne manje od 3%.

*Proklizavanje (slip) pri statičkom opterećenju:* Slip ne sme biti veći od 0.1 mm.

*Zamor pri cikličnom opterećenju zoni elastičnosti:* Mehanički nastavak mora da izdrži opterećenje na zamor od najmanje 2 miliona ciklusa, sa naponskom razlikom  $\Delta\sigma_a$  od 60 MPa.

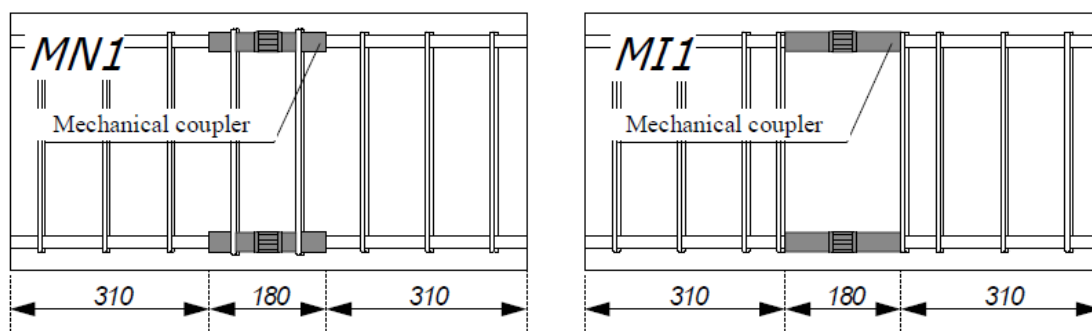
*Ponašanje pri niskocikličnom opterećenju u elastoplastičnoj oblasti:* Propisuje se maksimalno opterećenje i maksimalna zaostala deformacija za dva tipa niskocikličnog opterećenja kojima se modeliraju zemljotresi srednjeg i velikog intenziteta.

Sve navedene osobine mehaničkog spoja armature se odnose na aksijalno opterećenje. Treba napomenuti da [ISO 15835-1, 2009] u tački 3.4 definiše mehaničke spojnice kao čaure ili narezane spojnice čija je namena da prenesu silu zatezanja ili pritiska sa jedne na drugu šipku armature. Dakle, smicanje se ne razmatra.

U literaturi postoji relativno veliki broj radova koji objašnjavaju mehaničke nastavke armature, oblast i pogodnosti primene. Urađen je i veliki broj testova na zatezanje uglavnom za namenu dobijanja tehničkih dopuštenja u pojedinim zemljama.

[Rowell et al., 2009] su izvršili opsežno ispitivanje praktično svih vrsta mehaničkih spojnica na zatezanje sa kontrolisanom brzinom deformacije: sporom, srednje i velike brzine, u nameri da utvrde ponašanje ovih spojeva pri incidentnom eksplozivnom opterećenju, gde su se najbolje pokazale spojnice sa ravnim navojem (threaded rebar couplers).

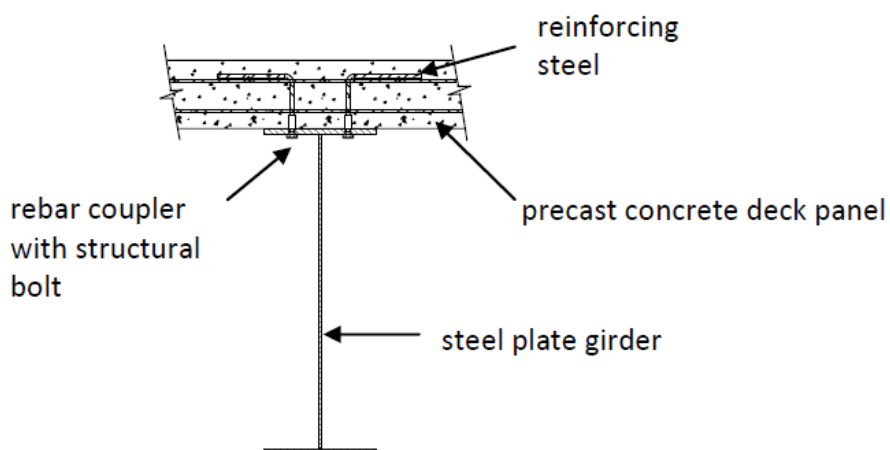
[Sanada et al., 2011] su razmatrali uticaj načina poprečnog armiranja u zoni mehaničkog nastavka armature u armiranobetonskoj gredi pri značajnim transverzalnim silama (slika 2.26). Na slici desno je predloženi način armiranja, da bi se izbeglo pomeranje podužne armature od ivice preseka zbog nešto veće debljine spojnice u odnosu na debljinu šipke.



**Slika 2.26** Ispitivanje načina poprečnog armiranja u zoni mehaničkog nastavka [Sanada et al., 2011]

Ispitivanja su pokazala da ovakav način lokalnog pregrupisavanja poprečne armature u zoni visokih transverzalnih sila ne utiče na ponašanje armiranobetonske grede, i preporučili ga za praktičnu primenu.

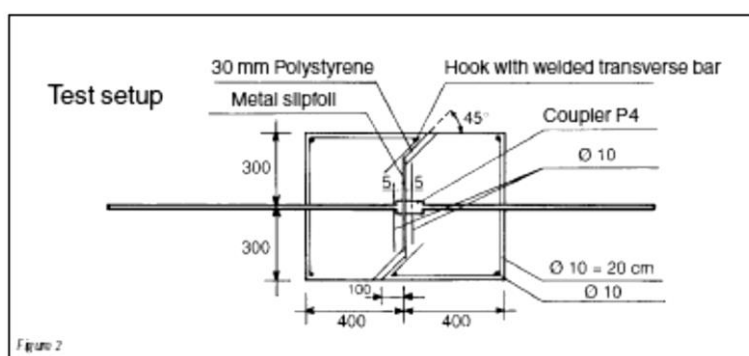
Redak primer razmatranja smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom u dostupnoj literaturi predstavlja upoređenje različitih tipova smičućih veza kod montažno-demontažnih spregnutih mostova koje je sproveo [Browser, 2010] (slika 2.27).



**Slika 2.27** Primena smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom kod montažno-demontažnih spregnutih mostova [Browser, 2010]

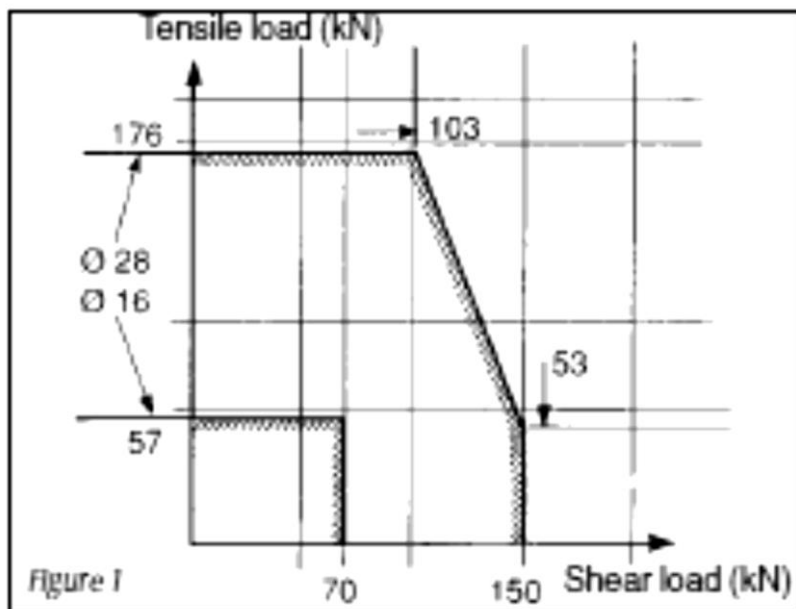
Upoređenje različitih smičućih veza sprovedeno je višekriterijumskom analizom, a interesantan je podatak da se, pri upoređenju jedinične cene montaže i demontaže, ovakva veza pokazala prihvatljiva sa ekonomskog aspekta.

Što se tiče proizvoda firme "Lenton", u [Lenton Katalog, 2009] je prikazan opit mehaničke spojnice na smicanje, kao dokaz pouzdanosti pri ovakvom opterećenju (slika 2.28).



**Slika 2.28** Ispitivane mehaničke spojnice na smicanje [Lenton Katalog, 2009]

Na prikazanom testu, spojnica, kao deo mehaničkog nastavka dve šipke, je ugrađena u armiranobetonski blok koji se sastoji od dva dela, odvojena metalnom folijom, koja omogućava medjusobno klizanje u vertikalnom pravcu. Šipke su opterećene zatezanjem, a spojnica, preko betonskih blokova, na smicanje. Na osnovu ovakvog testa konstruisan je interakcioni dijagram sila zatezanja – sila smicanja prikazan na slici 2.29.



**Slika 2.29** Dijagram smicanje – zatezanje za mehanički nastavak [Lenton Katalog, 2009]

Na dijagramu su prikazane moguće kombinacije sile zatezanja i sile smicanja za prečnike šipki  $\text{Ø}16$  i  $\text{Ø}28$ , uz koeficijent sigurnosti 1.75 i uslov da maksimalno poprečno pomeranje ne bude veće od 2.5mm.

Ovakav test daje informaciju o maksimalnom smicanju koje sama spojnica može da primi, ali sama dispozicija ispitivanja ne odgovara stanju naprezanja u armiranobetonskim gredama, a ni načinu naprezanja kome je spojnica izložena kao element smičućeg konektora koji je predmet istraživanja u okviru ove teze.

### 3 Eksperimentalna istraživanja

#### 3.1 Program eksperimentalnih istraživanja

Eksperimentalno istraživanje veze armiranobetonskog i čeličnog elementa preko mehaničkih spojnica sprovedeno je u cilju određivanja ponašanja i nosivosti ovakve veze pri statičkom opterećenju na smicanje. Ispitivanja su izvršena u Laboratoriji za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Ispitivani elementi se sastoje od dve armiranobetonske prizme između kojih je postavljen čelični valjani I profil (u daljem tekstu "uzorak"). Veza između čeličnog profila i betonskih prizmi ostvarena je preko smičućih konektora koji se sastoje od čeličnih zavrtnjeva i ubetoniranih mehaničkih spojnica usidrenih armaturnim ankerima (slika 1.10). Dispozicija uzorka je usvojena u skladu sa uzorkom za standardna ispitivanja smicanjem u skladu sa [EC4, 2004] Aneks B, sa odgovarajućim izmenama u dimenzijama betonskih prizmi. Umesto standardnih dimenzija 150x600 mm u osnovi, visine 650 mm ispitivane su prizme dimenzija u osnovi 300x300 i 300x400 mm, visina 650 i 550 mm respektivno. Ovakve dimenzije AB prizmi su odabrane tako da odgovaraju uobičajenim dimenzijama AB stubova u zgradarstvu. Ispitivana su po dva smičuća konektora sa obe strane uzorka, smeštena u jedan red. Sličnu varijaciju u odnosu na standardni opit primenili su [Xue et al. 2, 2012], pri ispitivanju grupa zavarenih moždanika veće dužine na uzorcima sa AB prizmama dimenzija 400x450 mm u osnovi. Geometrijske karakteristike uzoraka su navedene u tabeli 3.1.

**Tabela 3.1** Geometrijske karakteristike uzoraka

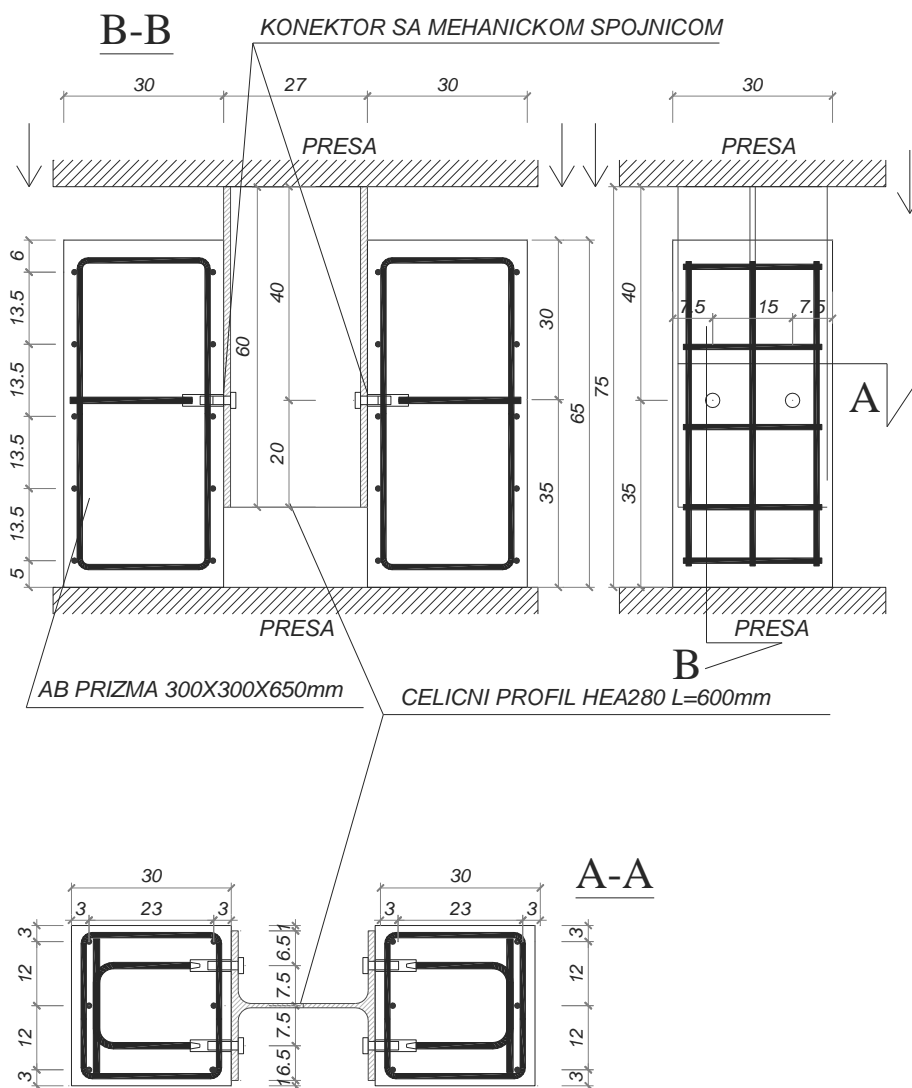
| Tip | Broj uzoraka | Dimenzije betonske prizme |       |        | Zavrtnanj |        | Mehanička spojnica |          | Armaturni anker | Rastojanje smičućeg konektora od ivice |
|-----|--------------|---------------------------|-------|--------|-----------|--------|--------------------|----------|-----------------|--|
|     |              | Osnova                    |       | Visina | Prečnik   | Dužina | Prečnik            | Dužina   |                 |  |
|     |              | $b_c$                     | $d_c$ | $h_c$  | $d$       | $L$    | $d_{co}$           | $L_{co}$ |                 |  |
|     |              |                           |       |        |           |        |                    |          |                 |  |
|     |              | mm                        | mm    | mm     | mm        | mm     | mm                 | mm       | mm              | mm                                     |
| A   | 4            | 300                       | 300   | 650    | 16        | 58     | 22                 | 59       | 12              | 75                                     |
| B   | 4            | 300                       | 300   | 650    | 16        | 58     | 22                 | 59       | 12              | 75                                     |
| C   | 4            | 300                       | 300   | 650    | 16        | 58     | 22                 | 59       | 12              | 100                                    |
| D   | 3            | 300                       | 400   | 550    | 16        | 75     | 22                 | 79       | 12              | 150                                    |
| E   | 3            | 300                       | 400   | 550    | 20        | 82     | 27                 | 93       | 16              | 150                                    |



Kod svih tipova uzoraka betonske prizme su povezane čeličnim profilom HEA 280 dužine 600 mm.

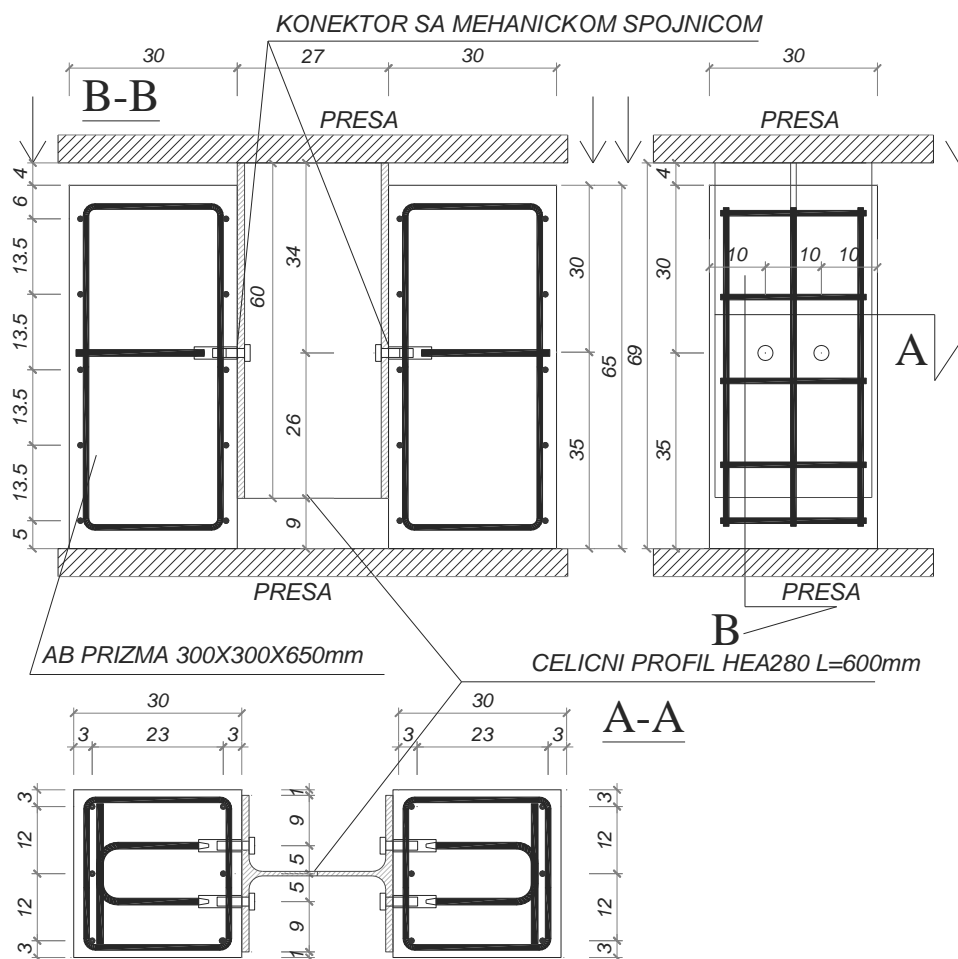
Ovo eksperimentalno istraživanje je izvršeno na laboratorijskoj opremi i po sličnoj metodologiji korišćenoj u istraživanju koje je sproveo [Spremić 2013] na smičućoj vezi preko zavarenih moždanika sa glavom i [Pavlović 2014] na smičućoj vezi preko ubetoniranih zavrtnjeva, i predstavlja deo serije istraživanja konektora na smicanje koje se sprovodi na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Dispozicija uzoraka je prikazana na slikama 3.1, 3.2 i 3.3. Razmak između konektora  $s$  iznosi 150 mm za uzorke serija A i B, a 100 mm za uzorke serija C, D i E.



**Slika 3.1** Uzorak tipa A i B, sa osnim razmakom smičućih konektora 150 mm

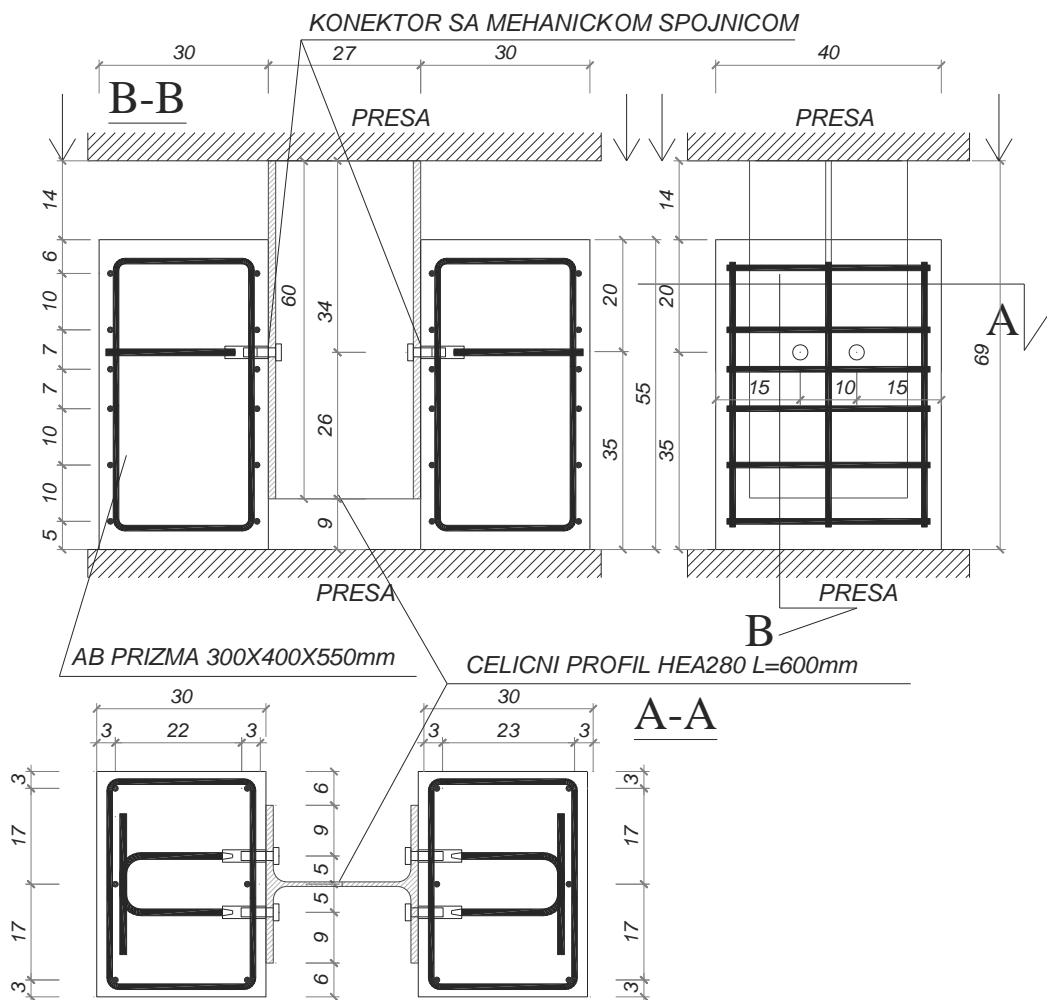
Uzorci seruja A i B se međusobno razlikuju po površini poprečne armature. Uzorci serije A su armirani uzengijama Ø8/11, a serije B Ø10/11 sa progušćenjem u zoni konektora na Ø10/5.5.



**Slika 3.2** Uzorak tipa C, sa osnim razmakom smičućih konektora 100 mm

Na prikazanim uzorcima veza između betona i čeličnog profila ostvarena je preko sistema elemenata koga čine: čelični zavrtnanj sa podložnom pločicom, mehanička spojnica tipa Lenton S13 [Lenton Katalog, 2008] i anker od rebraste armature. Spojnica i armaturni anker spojeni su preko koničnog navoja i ubetonirani su u prefabrikovane AB prizme uzoraka A - E.

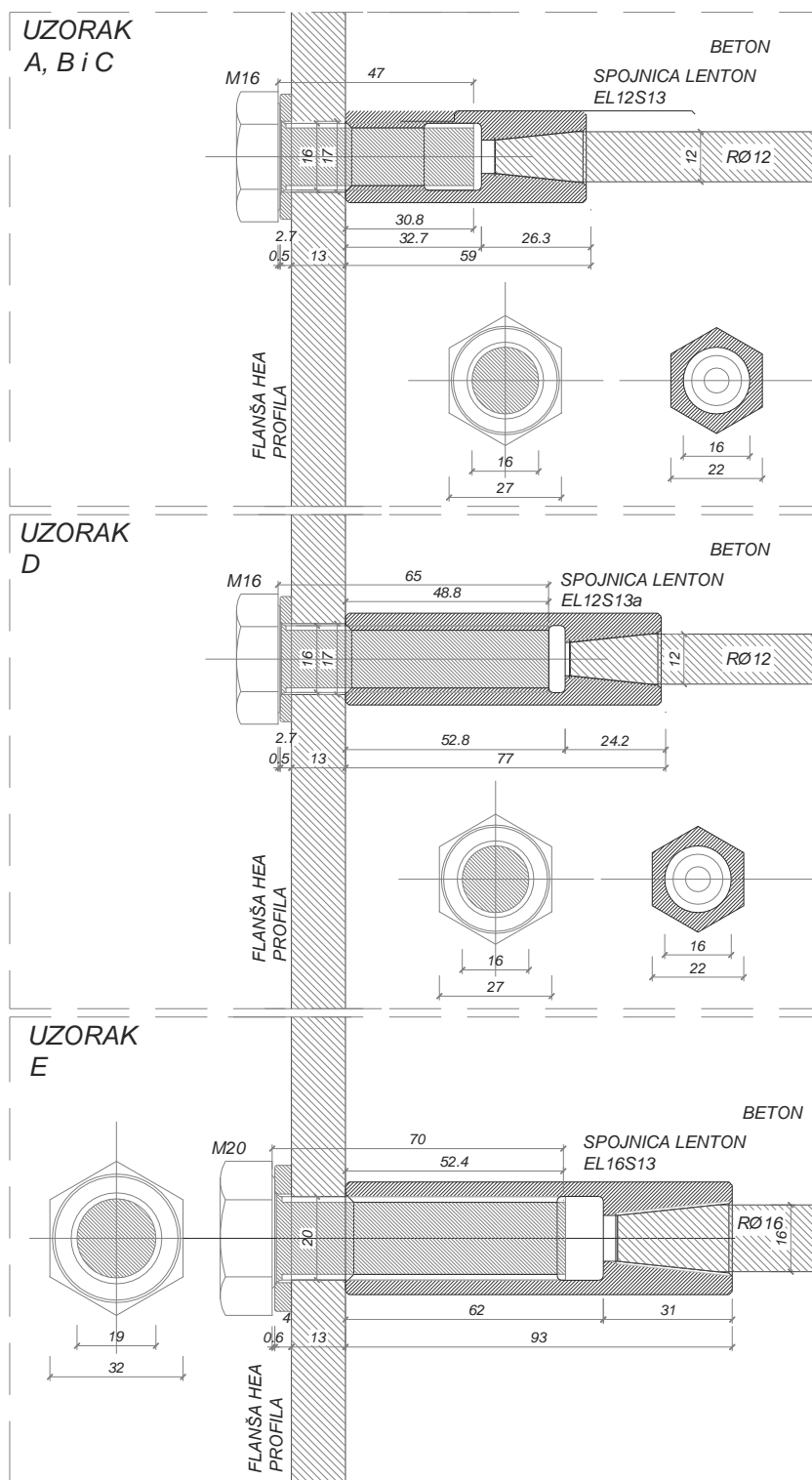
Na slici 3.4 prikazan je kompletiran smičući konektor koji čine zavrtnanj M16, armaturna spojnica Lenton EL12S13 i anker od rebraste armature Ø12. Detalji smičućih konektora ugrađenih u ispitivane uzorke A - E su detaljno prikazani na slici 3.5.



**Slika 3.3** Uzorak tipa D i E, dimenzija prizme 300x400 mm, razmak konektora 100 mm



**Slika 3.4** Smičući konektor sa zavrtnjem M16



**Slika 3.5** Detalji veze smičućih konektora na ispitivanim uzorcima

Prilikom montaže uzorka pre ispitivanja čelični profil je povezan sa prefabrikovanim armiranobetonskim prizmama. Na profilu su prethodno izbušene rupe po istom šablonu po kome su ugrađene mehaničke spojnice u armiranobetonske prizme.

Pvezivanje je izvršeno odgovarajućim zavrtnjima sa podložnim pločicama koji se ugrađuju uvrtačanjem u ubetonirane narezane mehaničke spojnice. Uzorci su ispitivani standardnim postupkom "push-out" testa na hidrauličkoj presi u Laboratoriji za materijale i konstrukcije (slika 3.6). Rezultati ispitivanja su prikazani u paragrafu 3.5



**Slika 3.6** Uzorak pripremljen za ispitivanje

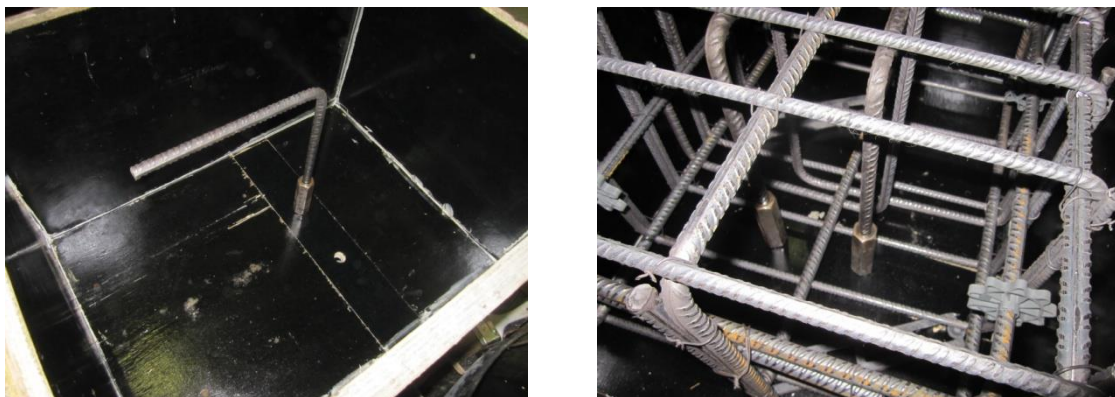
### **3.2 Priprema uzoraka**

Priprema uzoraka i njihovo ispitivanje je obavljeno u periodu od juna do decembra 2013. godine. Prefabrikovani armiranobetonski elementi serija A i B su betonirani u pogonu fabrike betona "Holcim" u Beogradu u junu (serija A) i septembru (serija B) 2013 godine. Ugrađena betonska mešavina je proizvedena u fabrici betona u pogonu. Ovi uzorci su ispitivani u julu i oktobru iste godine. Starost uzoraka pri betoniranju je prikazana u tabeli 3.2. Betoniranje je sprovedeno u drvenim kalupima koje je izradio tesarski pogon firme "Deneza" iz Beograda. Pripremljeni kalupi i ugrađivanje betona je prikazano na slici 3.7.



**Slika 3.7** Betoniranje uzoraka serije A

Prefabrikovani elementi serije uzoraka C, D i E betonirani su u hali za proizvodnju montažnih armiranobetonskih i prethodno napregnutih elmenata firme "Deneza" u Beogradu. Betonska mešavina je spravljena u fabrici betona u samom pogonu. Na slici 3.8 prikazan je način pričvršćivanja spojnice sa ankerom za oplatu. Oplata je tako konstruisana da je pravougaoni deo dna oplate na mestu otvora kroz koje se zavrtnjima privremeno pričvršćuje spojnica pre betoniranja, montažno-demontažan. Na ovaj način je omogućeno korišćene oplata za betoniranje nekoliko serija uzoraka sa različitim prečnicima zavrtnjeva i njihovim različitim međusobnim razmakom. Takođe, na ovaj način je obezbeđena veća preciznost ugradnje konektora, što je od ključnog značaja pri spajanju ovih AB prizmi sa čeličnim profilom pri formiranju uzorka.



**Slika 3.8** Pričvršćivanje ankera i spojnice za oplatu (serija D)



Na slici 3.9 prikazana je pripremljena oplata i armatura za elemente uzoraka serije D, kao i gotovi prefabrikovani elementi izvadjeni iz oplatae posle očvršćavanja. Pored izbetoniranih elemenata se vide i probna tela – kocke ivice 150 mm i cilindri prečnika 150 mm, visine 300 mm.



**Slika 3.9** Oplata sa armaturom i izbetonirani elementi serije D

### 3.3 Karakteristike materijala

U okviru eksperimentalnog istraživanja izvršena su ispitivanja mehaničkih karakteristika materijala ugrađenih u uzorke. Ispitivane su karakteristike ugrađenog betona, zavrtnjeva, mehaničkih spojnica LENTON i armature ankera. Posebna ispitivanja čelika HEA profila nisu vršena, jer se očekuje da nivo naprezanja ovog materijala tokom ispitivanja ostane daleko ispod granice elastičnosti.

#### 3.3.1 Beton

Prilikom betoniranja armiranobetonskih prizmi uzimana su probna tela koja su negovana u istim uslovima kao i same prizme. Prizme i probna tela su kvašena u periodu do sedam dana od betoniranja, a zatim čuvana van vode u prostorijama pogona i kasnije Laboratorije Građevinskog fakulteta. Probna tela su ispitivana istog dana kada je vršeno ispitivanje uzoraka. Za sve serije uzoraka uzeto je po šest kocki ivice 150 mm, dok je za serije C, D i E, pored kocki, uzeto i po tri cilindra prečnika 150 mm i visine

300 mm. Kocke su korišćene za određivanje čvrstoće betona pri pritisku, a cilindri za određivanje čvrstoće betona pri zatezanju cepanjem ("brazilski opit").

Svi betoni su spravljani sa standardnim trofrakcijskim agregatom, sa maksimalnim zrnom 16 mm. Betonske mešavine su spravljane u fabrikama betona "Holcim" i "Deneza". Ispitivanje uzoraka je izvršeno u periodu od 10 do 28 dana od betoniranja, kao što je prikazano u tabeli 3.2. Na ovaj način su ispitivanjima obuhvaćeni uzorci spravljani od "komercijalnih" betona, sa relativno ranim opterećivanjem veze, u skladu sa težnjom da se modelira smičuće veza u realnim konstrukcijama, sa aspekta betonske mešavine i moguće montaže i opterećenja veze pre isteka 28 dana od očvršćavanja betona.

U tabeli 3.2 prikazane su srednje vrednosti merenih čvrstoća kocke dimenzija 150 mm pri pritisku  $f_{cm,cube15}$ , kao i srednje vrednosti čvrstoća pri zatezanju cepanjem  $f_{ctm,sp}$ , iz kojih je dobijena srednja vrednost merene čvrstoće pri zatezanju. Proračunate su i srednje vrednosti čvrstoće pri zatezanju  $f_{ctm}$  i modula elastičnosti  $E_{cm}$ , za starost od 28 dana i za trenutak ispitivanja, iz merene čvrstoće pri pritisku kocke dimenzija 150 mm, preko čvrstoće kocke stranice 200mm  $f_{im,cube}$  i čvrstoće cilindra  $f_{cm}$  na 28 dana, uz korišćenje izraza za vezu pojedinih karakteristika materijala pri starostim različitim od 28 dana, a sve u skladu sa [EC2,2004]. Veze između navedenih veličina su prikazane jednačinama 3.1 do 3.8.

$$f_{ctm}^* = 0.9 f_{ctm,sp} \quad (3.1)$$

$$f_{cm,cube} = 0.95 f_{cm,cube15} \quad (3.2)$$

$$f_{cm} = f_{cm,cube}/1.2 \quad (3.3)$$

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0.3} \quad (3.4)$$

$$f_{ctm} = 0.3(f_{cm}-8)^{2/3} \quad (3.5)$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (3.6)$$

$$\text{gde je } \beta_{cc}(t) = \exp(0.25(1-(28/t)^{0.5}))$$

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{ctm}, \quad t < 28 \text{ dana} \quad (3.7)$$

$$E_{cm}(t) = [f_{cm}(t)/f_{cm}]^{0.3} E_{cm} \quad (3.8)$$



**Tabela 3.2** Mehaničke karakteristike ugrađenog betona

| Uzorak | Merene vrednosti |                 |              |             |               |          |           |          |              |             |
|--------|------------------|-----------------|--------------|-------------|---------------|----------|-----------|----------|--------------|-------------|
|        | t                | $f_{cm,cube15}$ | $f_{ctm,sp}$ | $f_{ctm}^*$ | $f_{cm,cube}$ | $f_{cm}$ | $f_{ctm}$ | $E_{cm}$ | $f_{ctm}(t)$ | $E_{cm}(t)$ |
|        |                  | MPa             | MPa          | MPa         | MPa           | MPa      | MPa       | MPa      | MPa          | MPa         |
| A      | 28               | 33.60           | -            |             | 31.92         | 26.60    | 2.106     | 29504    | 2.106        | 29504       |
| B      | 15               | 30.96           | -            |             | 32.23         | 26.86    | 2.126     | 29591    | 1.940        | 28789       |
| C      | 15               | 43.48           | 2.302        | 2.072       | 45.27         | 37.72    | 2.879     | 32764    | 2.627        | 31877       |
| D      | 12               | 36.07           | 2.360        | 2.124       | 39.10         | 32.58    | 2.536     | 31355    | 2.223        | 30139       |
| E      | 10               | 42.07           | 2.590        | 2.331       | 47.29         | 39.41    | 2.987     | 33198    | 2.524        | 31563       |



**Slika 3.10** Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju

U tabeli 3.2, kao ilustracija, su prikazane vrednosti srednje čvrstoće betona pri zatezanju  $f_{ctm}(t)$  izvedene iz čvrstoće betona pri pritisku po formuli 3.5, koje se razlikuju se od vrednosti dobijenih merenjem  $f_{ctm}^*$ . Razlika iznosi do 14 %. U daljim proračunima i prilikom formiranja numeričkog modela korišćene su mehaničke karakteristike dobijene ispitivanjima na probnim telima.

### 3.3.2 Zavrtnjevi

U okviru programa ispitivanja predviđena je upotreba zavrtnjeva klase čvrstoće 8.8. Zavrtnjevi su svrstani u tri serije i razlikuju se po prečniku, mestu primene i vremenu isporuke. Seriju 1 čine zavrtnjevi M16 dužine navoja 47 mm, korišćeni za

uzorke A, B i C, seriju 2 zavrtnjevi M16 dužine navoja 65 mm, korišćeni za uzorke D i seriju 3 zavrtnjevi M20 dužine navoja 70 mm, za uzorke serije E.

Ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala je izvršeno u Laboratoriji Metaluškog fakulteta u Beogradu na probnim telima u obliku epruveta prečnika 6mm. Dispozicija ispitivanja epruveta prikazana je na slici 3.11. Izduženja baze na epruveti tokom ispitivanja merena su ekstenziometrom.

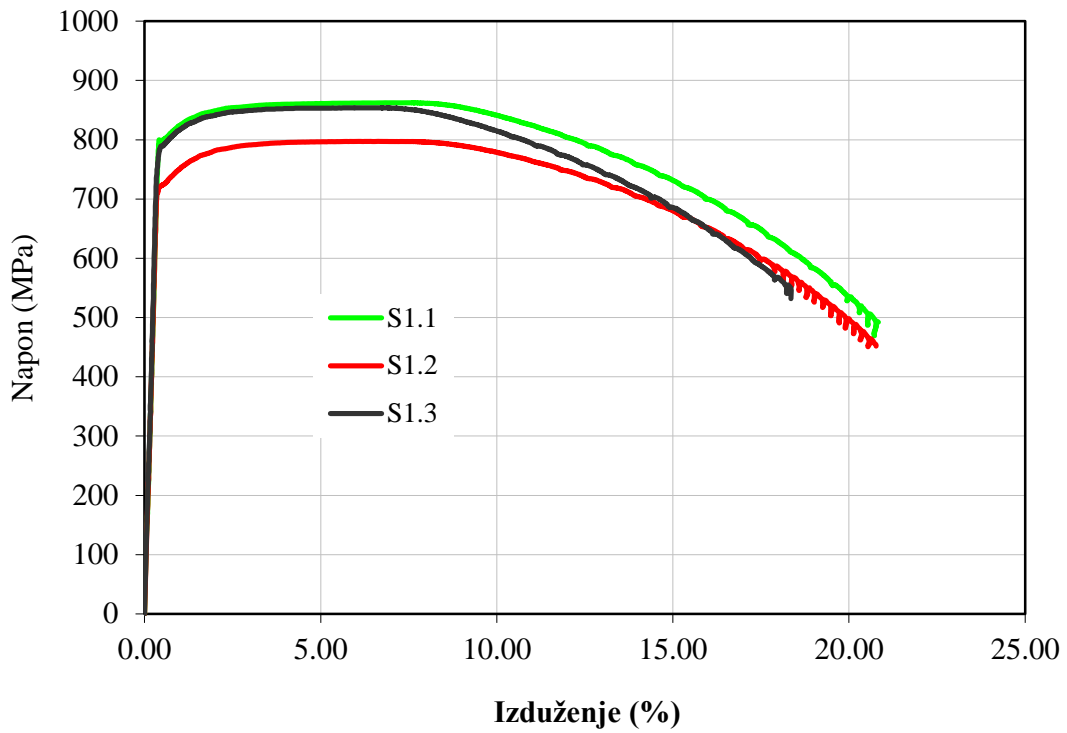


**Slika 3.11** Dispozicija ispitivanja čeličnih epruveta na zatezanje  
Na slici 3.12 prikazane su epruvete is serije 1 i 3 posle ispitivanja.

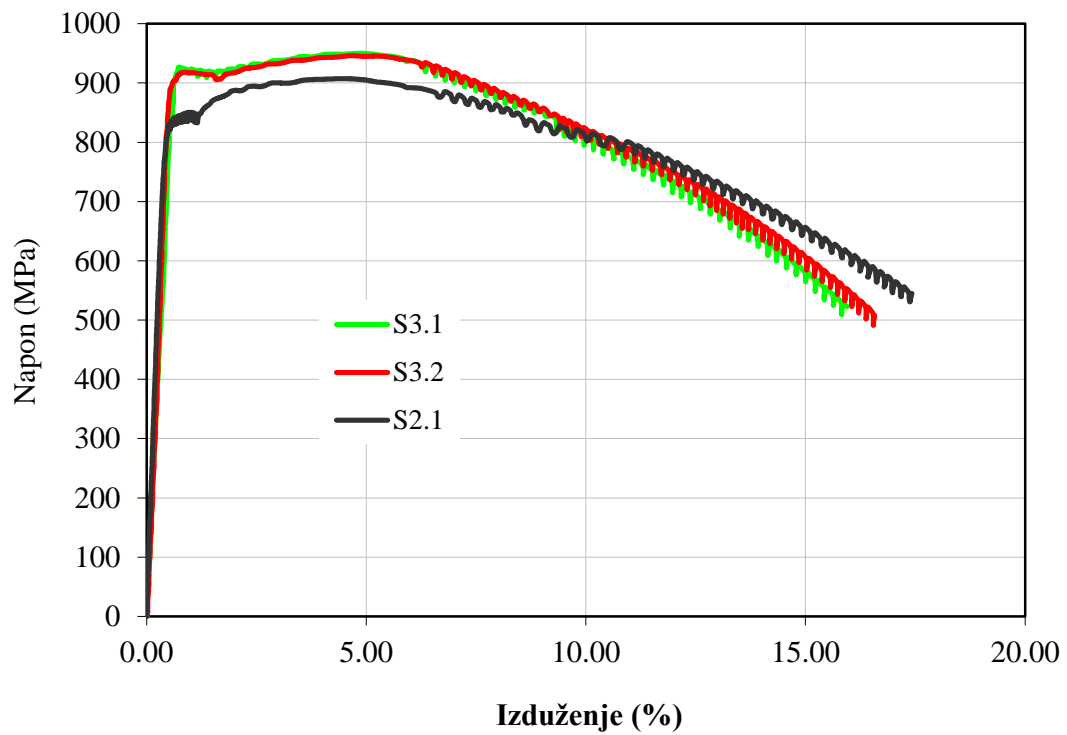


**Slika 3.12** Epruvete iz zavrtnjeva M16 i M20 posle ispitivanja

Na osnovu merenih vrednosti sile na presi i izduženja baze ekstenziometra formirani su dijagrami napon dilatacija, koji su prikazani na slikama 3.13 i 3.14



**Slika 3.13** Dijagrami napon-dilatacija za ispitivane zavrtnjeve M16 (serija 1)



**Slika 3.14** Dijagrami napon-dilatacija za ispitivane zavrtnjeve M16 (serija 2) i M20 (serija 3)

Na osnovu merenih vrednosti mehaničkih karakteristika materijala zavrtnjeva, proračunate su i, u tabeli 3.3, prikazane srednje vrednosti granice razvlačenja  $f_{02}$ , čvrstoće pri zatezanju  $f_{ub}$  i granične dilatacije  $\varepsilon_u$ . Navedene su i serije uzoraka u koje su zavrtnjevi iz pojedinih serija ugrađeni.

**Tabela 3.3** Mehaničke karakteristike zavrtnjeva na osnovu rezultata merenja

| Seriya | Prečnik | $f_{02}$ | $f_{ub}$ | $\varepsilon_u$ | Uzorak  |
|--------|---------|----------|----------|-----------------|---------|
|        |         | MPa      | MPa      | %               |         |
| 1      | M16     | 765.50   | 837.67   | 19.98           | A, B, C |
| 2      | M16     | 830.00   | 907.00   | 17.42           | D       |
| 3      | M20     | 916.25   | 948.00   | 16.03           | E       |

Prilikom nabavke zavrtnjeva koji su korišćeni u ispitivanjima, specificirana je klasa čvrstoće 8.8. Iz rezultata ispitivanja mehaničkih karakteristika se može uočiti da zavrtnjevi serije 2, a pogotovu serije 3 imaju veće vrednosti čvrstoće, koja se približava vrednostima koje su propisane za klasu 10.9.

### 3.3.3 Mehaničke spojnice LENTON

Mehaničke spojnice korišćene u uzorcima predstavljaju proizvod firme Lentom ERICO, i isporučene su u okviru saradnje Građevinskog fakulteta u Beogradu i ove kompanije. O Lenton spojnicama je više reči bilo u uvodnom delu, gde je opisana njihova široka primena u nastavljaju zategnutih armaturnih šipki, a posebno je prikazan sistem spojnica S13, namenjen za nastavljjanje armature u čeličnih zavrtnjeva.



**Slika 3.15** Mehaničke spojnice: EL16S13, EL12S13a i EL12S13

Za konstruisanje smičuće veze na ispitivanim uzorcima korišćene su spojnice EL16S13 (za nastavljjanje zavrtnjeva M20 i armature prečnika 16mm) i spojnice EL12S13 (za nastavljjanje zavrtnjeva M16 i armature prečnika 12mm) [Lenton Katalog, 2008].

Korišćene su dve varijacije spojnice EL12S13, različite po dužini. Detalji pojedinih spojnica su prikazani sa slici 3.4. Spojnice, kao što je prikazano na slici 3.15, na jednoj svojoj strani imaju urezan konični navoj za spoj sa armaturom (na slici levo), a na drugoj navoj za spoj sa zavrtnjem (na slici desno). Osnovne geometrijske karakteristike i mesto primene su prikazane u tabeli 3.4.

**Tabela 3.4** Geometrijske karakteristike ugrađenih spojnica

| Tip     | Zavrtnaj | Armatura | $d_k$ | $L_k$ | Uzorak  |
|---------|----------|----------|-------|-------|---------|
|         |          |          | mm    | mm    |         |
| E12S13  | M16      | Ø12      | 22    | 59    | A, B, C |
| E12S13a | M16      | Ø12      | 22    | 79    | D       |
| E16S13  | M20      | Ø16      | 27    | 93    | E       |

Proizvođač spojnica je dostavio i zvanične rezultate ispitivanja šarži čelika od kojih su pojedine serije spojnica proizvedene. Rezultati su dobijeni u okviru redovne kontrole kvaliteta na epruvetama dobijenim iz šestougaonih punih profila, od kojih su kasnije urezivanjem proizvedene spojnice sa navojima. Ispitivana je čvrstoća pri zatezanju, granica razvlačenja i maksimalna dilatacija pri lomu [Lenton Certificate, 2012]. Dobijene srednje vrednosti prikazane su u tabeli 3.5.

**Tabela 3.5.** Mehaničke karakteristike spojnica

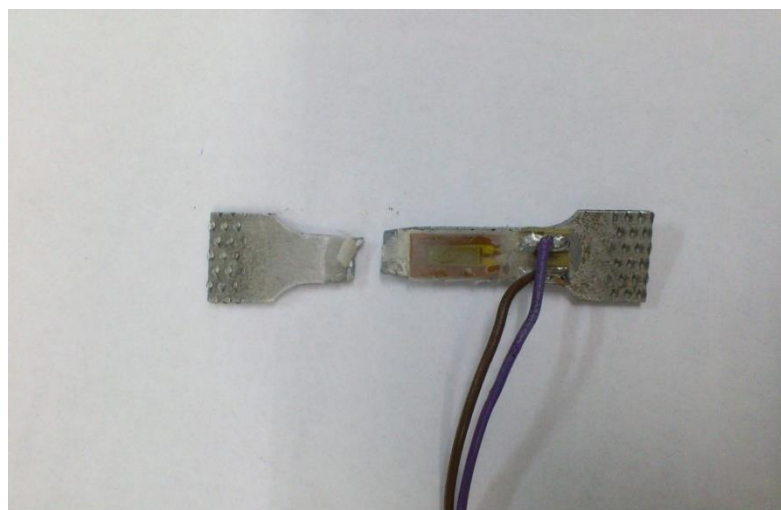
| Oznaka šarže | Zavrtnaj | Uzorak | $R_m$ | $R_{p0.2}$ | $\epsilon_{zu}$ |
|--------------|----------|--------|-------|------------|-----------------|
|              |          |        | MPa   | MPa        | %               |
| KDV-E0915    | M16      | A B C  | 790   | 670        | 7.9             |
| JXM-E0798    | M16      | D      | 808   | 691        | 9.5             |
| KFK-E0950    | M20      | E      | 803   | 694        | 8.9             |

U cilju potvrde ovih vrednosti, sprovedeno je kontrolno ispitivanje epruveta dobijenih iz čaura za šaržu KDV-E0915 od koje su spravljane spojnice tipa E12S13. Ovaj tip spojnica je ugrađen u najveći broj uzoraka, koji su hronološki prvi ispitivani. S obzirom na dimenzije mehaničkih spojnica, pogotovu na debljinu zida, bilo je relativno teško napraviti odgovarajuće epruvete. Iz spojnice se mogao izvući samo pravougaoni presek epruvete, dužine 55 mm sa mernom bazom od 25 mm (slika 3.16), na kojoj nije mogao da se upotrebi raspoloživi ekstenziometar sa bazom od 50 mm.



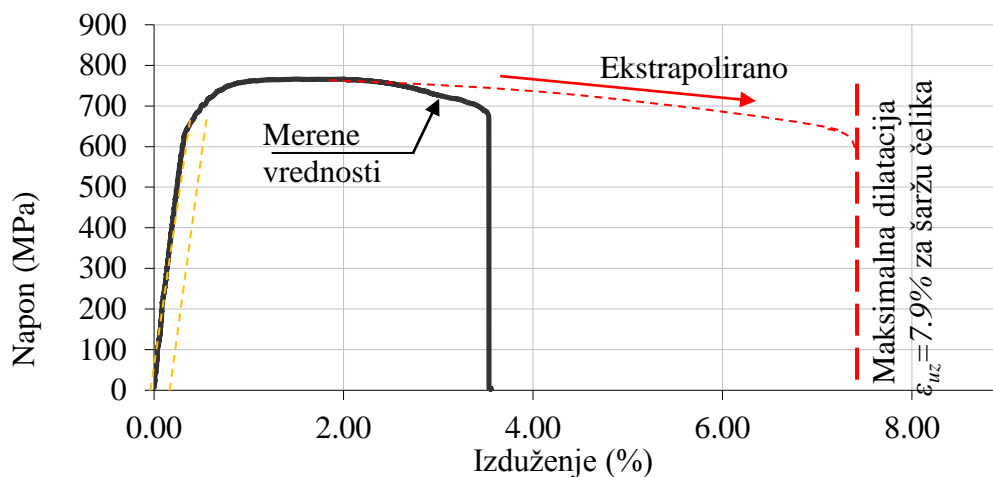
**Slika 3.16** Epruvete formirane iz mehaničkih spojnica

Na ovakvim epruvetama je merena čvrstoća pri zatezanju, a veza napona i izduženja je merena pomoću mernih traka koje su postavljene duž baze epruvete (slika 3.17).



**Slika 3.17** Epruveta formirana iz mehaničke spojnice sa mernom trakom, posle ispitivanja

Ograničenje pri ovakvom ispitivanju predstavljao je opseg raspoloživih mernih traka, koji iznosi 3.5%, što je znatno manje od maksimalnih dilatacija čelika pri lomu (oko 9%). Ovo ispitivanje je dalo zavisnost napona i izduženja u zoni granice razvlačenja i čvrstoće pri zatezanju. Na slici 3.18 prikazan je dijagram napon-dilatacije, merene vrednosti, i sa, isprekidanom linijom prikazanom, odgovarajućom ekstrapolacijom do maksimalne dilatacije pri lomu  $\epsilon_u$  prema podacima proizvođača za datu šaržu čelika.



**Slika 3.18** Dijagrami napon-dilatacija za ispitivane uzorke spojnice E12S13

Poređenje merenih vrednosti za ispitivane epruvete iz mehaničkih spojnica sa vrednostima iz specifikacija koje je dostavio proizvođač, za odgovarajuću šaržu čelika, je prikazano u tabeli 3.6.

**Tabela 3.6** Mehaničke karakteristike materijala mehaničkih spojnica

|               |      | Uzorak | $f_{02}$ | $f_{ub}$ |
|---------------|------|--------|----------|----------|
|               |      |        | MPa      | MPa      |
| Merenе        | S1.1 | -      | -        | 778.32   |
|               | S1.2 | -      | -        | 772.46   |
|               | S1.3 | -      | -        | 768.66   |
|               | S1.4 | 702.00 | 765.86   |          |
| Srednja       |      |        | 702.00   | 771.33   |
| Specifikacija |      |        | 670.00   | 790.00   |
| Razlika (%)   |      |        | 4.56     | 2.42     |

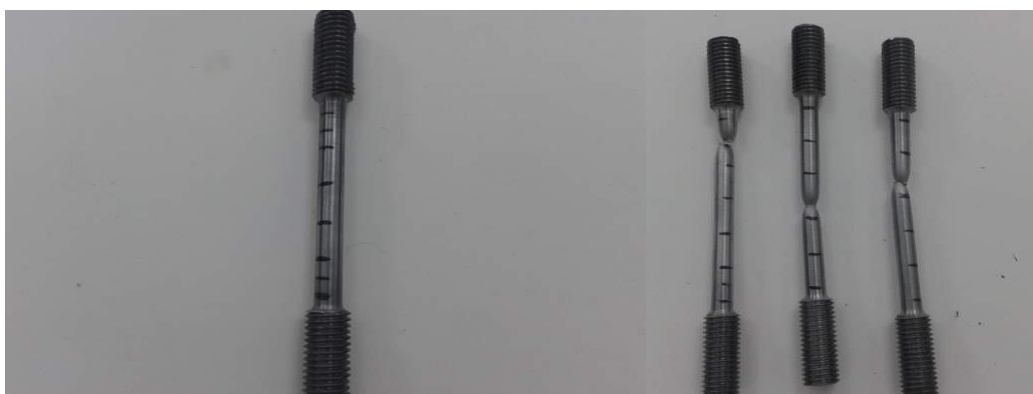
Prikazane vrednosti pokazuju dobro slaganje merenih tokom ispitivanja i vrednosti iz specifikacije proizvođača, na osnovu čega se može zaključiti da se vrednosti dostavljene za pojedine šarže čelika mogu koristiti za dalju analizu u okviru istraživanja.

### 3.3.4 Armatura za ankere

Kao što je prikazano u detaljima ispitivane veze, za ankerisanje mehaničkih spojnica u beton korišćena je rebrasta armatura Ø12 za serije uzoraka A do D, i rebrasta armatura Ø16 za ankere uzoraka serije E. Dispozicija ispitivanja je prikazana na slici 3.19, a uzorci na slici 3.20.



**Slika 3.19** Detalj ispitivanja epruvete od armaturne šipke



**Slika 3.20** Epruvete iz armaturnih šipki pre i posle ispitivanja

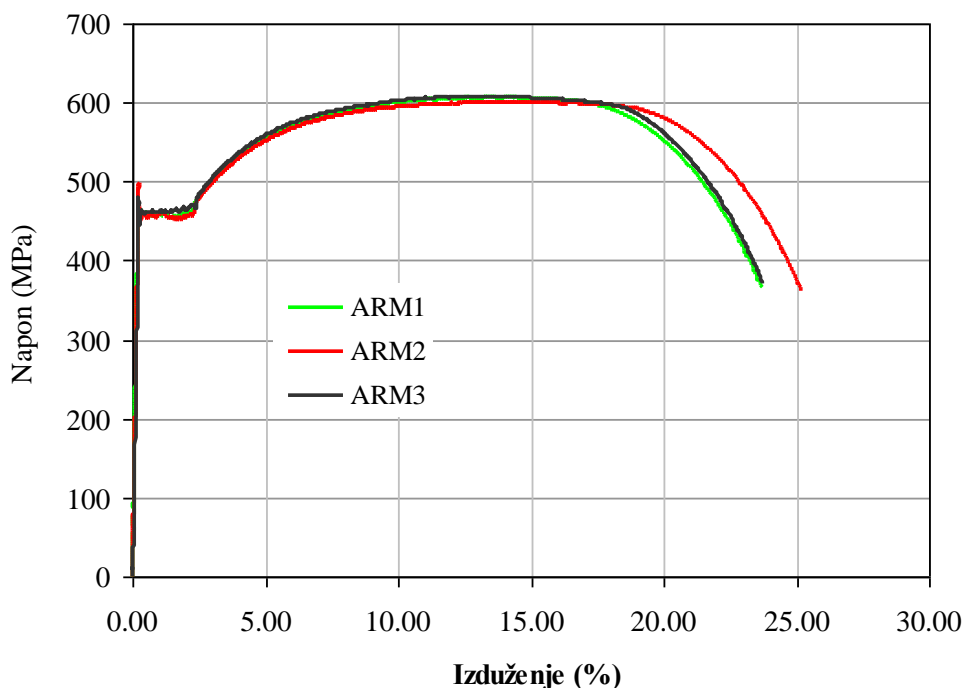
U tabeli 3.6 prikazane su srednje vrednosti granice razvlačenja  $f_{02}$ , čvrstoće pri zatezanju  $f_{ub}$  i granične dilatacije  $\varepsilon_u$ , dobijene ispitivanjem. Dobijeni rezultati odgovaraju klasi armature 500/600.

**Tabela 3.6** Mehaničke karakteristike čelika armature na osnovu rezultata merenja

| Uzorak           | $f_{02}$ | $f_{ub}$ | $\varepsilon_u$ |
|------------------|----------|----------|-----------------|
|                  | MPa      | MPa      | %               |
| S1.1             | 475.5    | 607      | 11.856          |
| S1.2             | 476.5    | 601      | 12.598          |
| S1.3             | 469      | 608      | 11.859          |
| Srednja vrednost | 473.67   | 605.33   | 12.10           |



Na osnovu merenja sile na presi i izduženja baze merenih ekstenziometrom tokom ispitivanja, konstruisani su dijagrami napon – dilatacija, prikazani na slici 3.21.

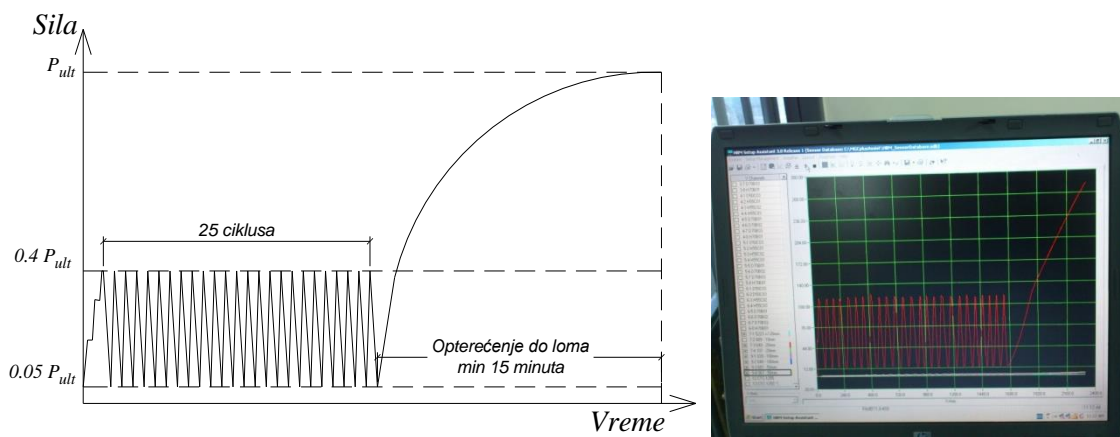


**Slika 3.21** Dijagrami napon-dilatacija za ispitivane uzorke armature

### 3.4 Dispozicija i postupak ispitivanja uzoraka

Kao što je navedeno u tački 1.1 ovog poglavlja, eksperimentalno ispitivanje veze je sprovedeno na pet serija uzoraka. Prve tri serije činila su po četiri uzorka, a četvrtu i petu po tri uzorka. Uzorak, prikazan na slici 3.6, i objašnjen u tački 3.1 ovog poglavlja, sastoji se od dve betonske prizme i čeličnog profila koji su povezani preko smičućih konektora koje čine zavrtanj, mehanička spojnica i armaturni anker (slika 3.4). Uzorak je postavljen u presu preko čelične ploče debljine 30 mm, pošto je donja površina prese nešto uža od betonskih prizmi uzorka. Betonske prizme su postavljene na ploču preko sloja gipsanog maltera, u cilju ostvarivanja uniformnog površinskog oslanjanja i umanjenja efekata eventualne nesimetrije. Sila se na uzorak nanosi pritiskom hidraulične prese na čelični profil. Korišćena je presa u Laboratoriji za materijale Građevinskog fakulteta, kapaciteta 3500kN sa mogućnošću kontinualnog nanošenja deformacije. Kontakt prese i uzorka ostvaren je preko čelone čelične ploče i dozne za merenje sile pritiska proizvođača "Hottinger". Nanošenje sile je kontrolisano preko kontrolnog pulta prese kontinualno praćeno preko dozne (slika 3.23).

Opterećenje je zadavano u skladu sa šemom koja je propisana u [EC4, 2004], Aneks B, tako što se opterećenje nanosi u 25 ciklusa od 5 do 40 procenata očekivane sile loma ("treniranje"), a zatim opterećenjem do loma u periodu ne kraćem od 15 minuta. Šema nanošenja opterećenja je prikazana na dijagramu slika 3.22.



**Slika 3.22** Šema nanošenja i praćenje opterećenja

Očekivana sila loma je procenjena preko nosivosti 4 zavrtnja na smicanje definisane u [EC3, 2005] i date jednačinom 3.9

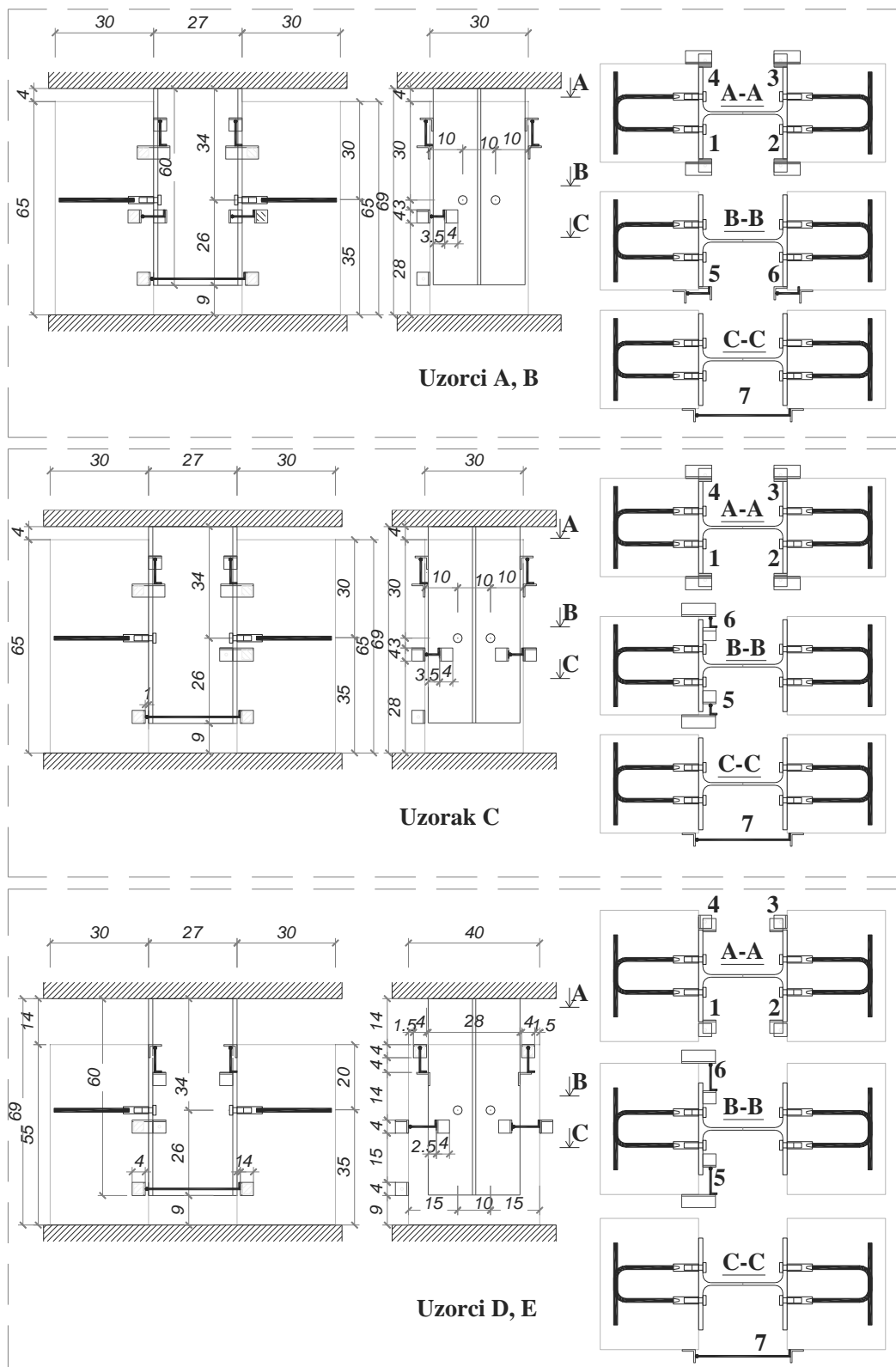
$$F_{v,R} = 0.6f_{ub}A \quad (3.9)$$

gde je  $f_{ub}=800\text{MPa}$  čvrstoća pri zatezanju zavrtnjeva klase čvrstoće 8.8, a  $A$  neto površina zavrtnja. S tim u skladu su uzorci A do D sa zavrtnjevima M16 ciklično opterećivani u granicama od 15 do 120 kN, a uzorak E, sa zavrtnjevima M20, od 25 do 200 kN.



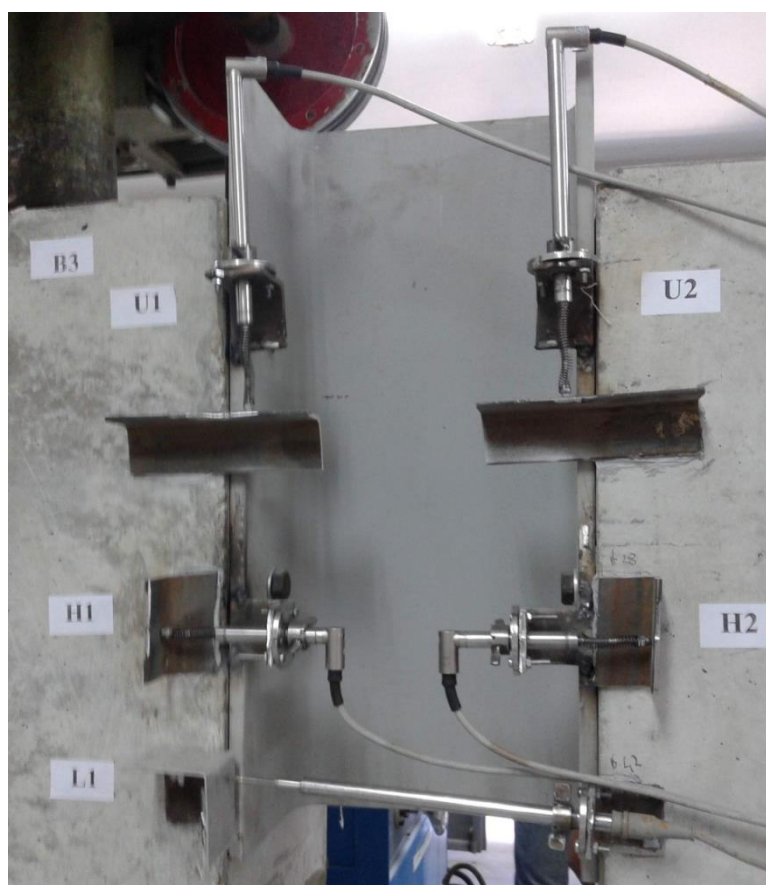
**Slika 3.23** Presa sa uzorkom i kontrolni pult

Deformacija uzoraka je merena pomoću induktivnih ugibomera LVDT (Linear Variable Displacement Transducer - "HBM W A L"). Dispozicija mernih mesta je prikazana na slici 3.24.



**Slika 3.24** Raspored induktivnih ugibomera za merenje deformacija na uzorcima

Vertikalno pomicanje čeličnog profila u odnosu na armiranobetonske prizme (u daljem tekstu "pomicanje"), praćeno je sa četiri ugibomera – merna mesta 1 do 4. Na mernim mestima 5 i 6 mereno je horizontalno razmicanje čeličnog profila i betona u pravcu konektora kod uzoraka serija A i B (u daljem tekstu "odvajanje"), odnosno horizontalno razmicanje ivice betona i čeličnog profila upravno na konektor, kod uzoraka serija C, D i E (u daljem tekstu "poprečno razmicanje"). Na mernom mestu 7 praćeno je razmicanje dve betonske prizme( u daljem tekstu "razmicanje"). Svi podaci su snimani kontinualno preko višekanalnog akvizicionog uređaja Hottinger MGC+. Detalj uzorka opremljenog LVDT senzorima je prikazan na slici 3.25.



**Slika 3.25** Uzorak opremljen ugibomerima

### 3.5 Rezultati ispitivanja uzoraka

Svih pet serija uzoraka opisanih u prethodnoj tački su opterećeni u skladu sa šemom opterećenja prikazanom na slici 3.22, i dovedeni do loma. Lom je nastao na smičućim konektorima, kao što je to i bilo predviđeno, i u skladu sa dispozicijom

ispitivanja uzoraka. i to, u skoro svim slučajevima, smicanjem zavrtnjeva. Na slici 3.26 su prikazani uzorci serija C, D i E posle ispitivanja.



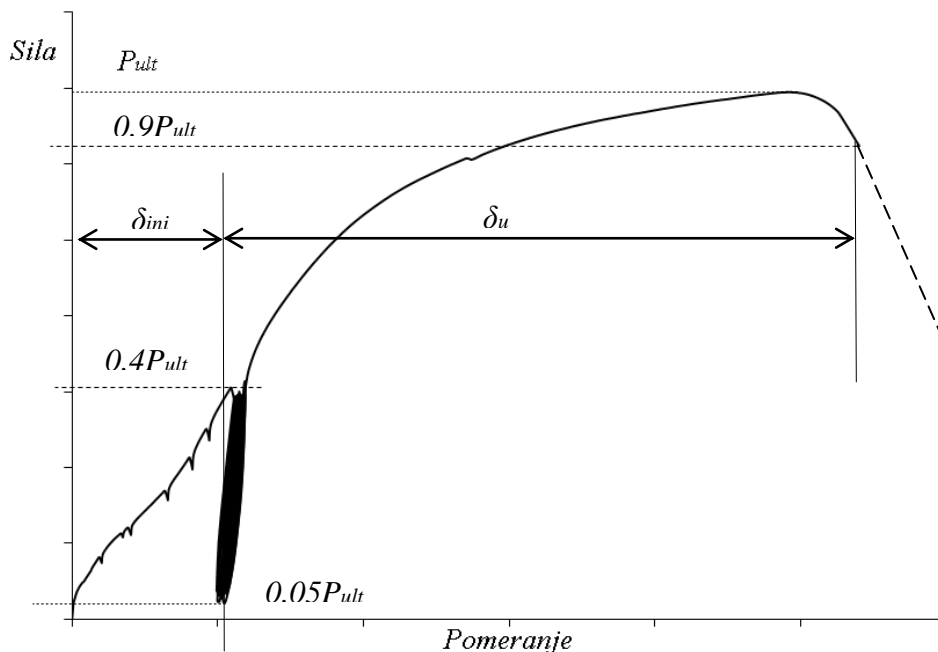
**Slika 3.26** Uzorci posle ispitivanja, serije C, D i E

Kod uzoraka serije A i B, pre dostizanja konačnog loma zavrtnja, javio se lom betona usled blizine ivice. Takođe, u svim slučajevima, u manjoj ili većoj meri, došlo je do oljuskavanja površinskog sloja betona u zoni neposredno ispod konektora.

Tokom nanošenja opterećenja, pa sve do dostizanja loma, merena je sila pritiska na presi, relativna vertikalna pomeranja čeličnog profila, kao i odvajanje i poprečno razmicanje razmicanja čelika i betona, kao i razmicanje dve betonske prizme međusobno.

U skladu sa dipozicijom i načinom sprovođenja ovakvog ispitivanja uzoraka koji su propisani u [EC4, 2004] Aneks B, osnovni rezultat eksperimenta predstavlja dijagram **sila na presi - pomeranje**, prikazan na slici 3.27. Glavni parametri koji određuju nosivost smičuće veze su granična sila  $P_{ult}$  i granično pomeranje  $\delta_u$ , koji su definisani na istoj slici.

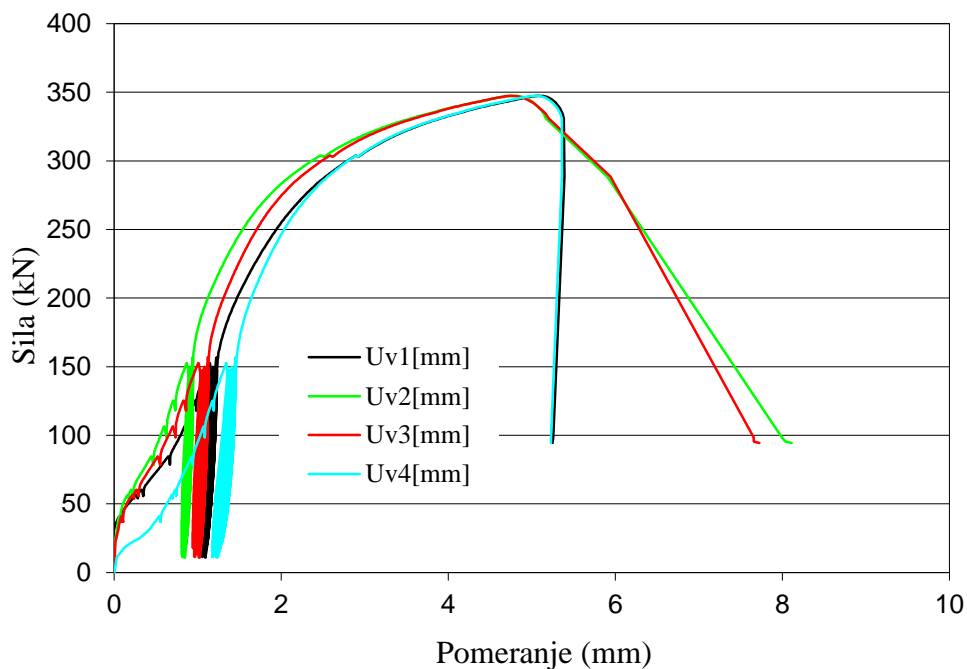
Kao što je na slici 3.27 prikazano, granično vertikalno pomeranje  $\delta_u$  je definisano od kraja ciklične faze opterećenja, koja se sastoji od 25 ciklusa u intervalu sile od 5 do 40% maksimalne sile, pa sve do loma, koji se, prema [EC4, 2004], definiše dostizanjem pomeranja koje odgovara padu sile na 90% njene maksimalne vrednosti. Ovom pomeranju prethodi inicijalno pomeranje  $\delta_{ini}$ , od nule do kraja ciklične faze.



**Slika 3.27** Karakteristični dijagram sila - pomeranje

U narednim delovima ovog poglavlja prikazani su rezultati ispitivanja po serijama. Za svaku seriju je prikazan dijagram sila – pomeranje, gde jednom uzoraku iz serije odgovara jedna kriva. Pomeranja koja određuju ove krive su dobijena kao srednja vrednost dobijena merenjem ugibomerima na mernim mestima 1 do 4 prema dispoziciji na slici 3.24, i to bez inicijalnog pomeranja, dakle od kraja ciklične faze do loma. Kao ilustracija, na slici 3.28 prikazan je kompletan zapis merenja na mernim mestima 1 do 4 za uzorak A1.

Pored dijagrama sila - vertikalno pomeranje, za serije A i B, u narednim tačkama prikazan je i dijagram sila – odvajanje čeličnog profila i betonske prizme, kao srednja vrednost rezultata sa mernih mesta 5 i 6, takođe od kraja cilličnog opterećenja do loma.



**Slika 3.28** Uzorak A1 – rezultat merenja na mernim mestima 1-4

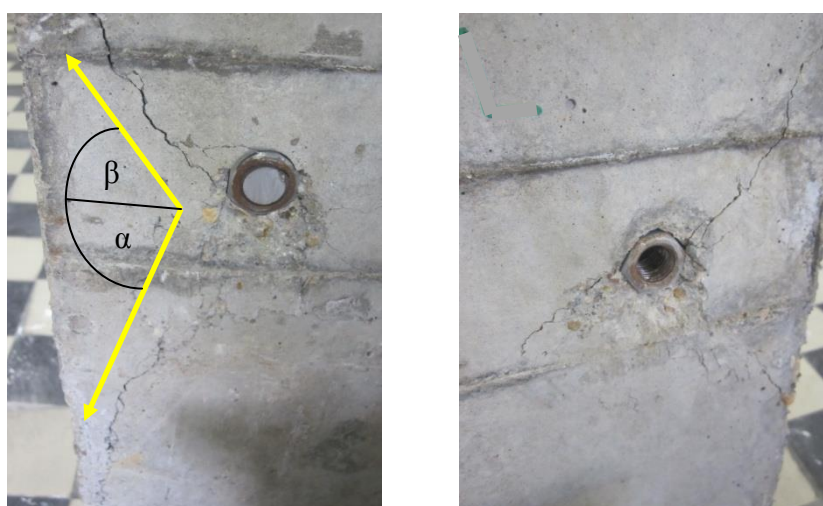
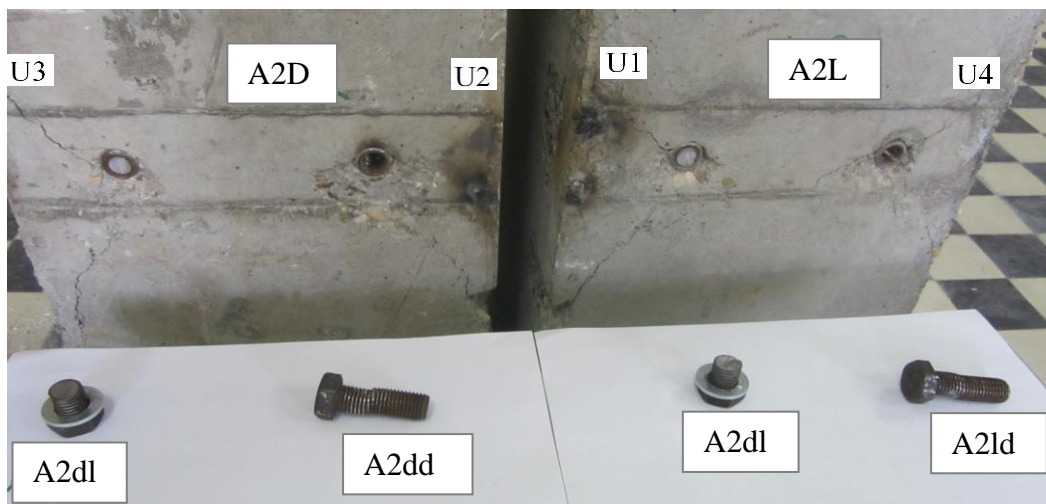
### 3.5.1 Rezultati ispitivanja uzoraka serije A

Geometrija i karakteristike uzorka serije A, kao i ostalih serija, detaljno je opisana u prethodnim delovima ovog poglavlja. Karakteristično za uzorke ove serije je da je pre dostizanja granične nosivosti zavrtnja, i potpunog otkaza merene sile, došlo do karakterističnog loma usled blizine ivice betona. Ovaj lom se ogleda u formiranju kosih pukotina ispred, pod uglom  $\alpha$ , i iza smičućeg konektora, pod uglom  $\beta$  u odnosu na horizontalu, koje propagiraju od konektora prema ivici betona. Na slici 3.29 prikazan je uzorak A2 posle ispitivanja.

Ugao  $\alpha$  kreće se u granicama od  $50^\circ$  do  $60^\circ$ , a ugao  $\beta$  u granicama od  $30^\circ$  do  $45^\circ$ . Pored pomenutih pukotina pojavljuje se i horizontalna prslina između konektora.

Ovakva dispozicija pukotina odgovara uobičajenom lomu usled blizine ivice, opisanom u literaturi (poglavljje 2). Pojava ovakvog loma je očekivana, pre svega usled relativno malog rastojanja konektora od ivice betona  $c = 75$  mm, kao i relativno niske srednje čvrstoće betona na pritisak  $f_{cm} = 26.6$  MPa (tabela 3.2). Maksimalni otvor prikazanih pukotina je 1mm.





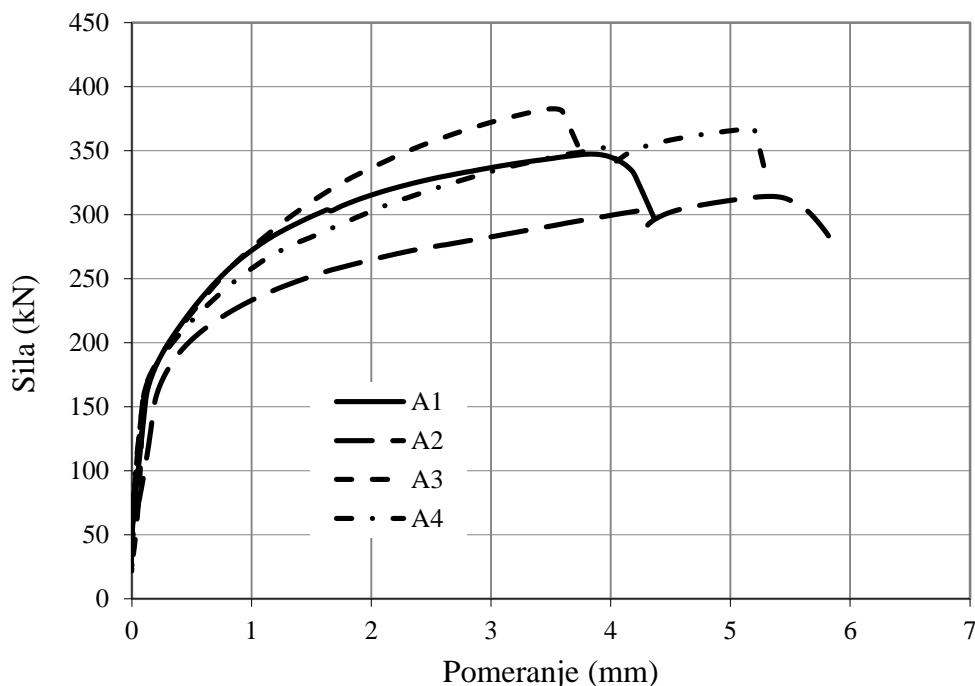
**Slika 3.29** Uzorak A2 posle ispitivanja do loma

**Tabela 3.8** Granične sile i pomeranje za uzorake serije A

|                | $P_{ult}$ | $\delta_{ini}$ | $\delta_u$ |
|----------------|-----------|----------------|------------|
|                | <i>kN</i> | <i>mm</i>      | <i>mm</i>  |
| A1             | 347.43    | 1.078          | 4.360      |
| A2             | 314.35    | 1.365          | 5.820      |
| A3             | 382.78    | 1.069          | 3.770      |
| A4             | 331.05    | 1.352          | 5.805      |
| <i>Srednja</i> | 343.90    | 1.216          | 4.939      |
| $s_x$          | 29.23     |                | 1.037      |
| $V_x$ (%)      | 8.50      |                | 21.003     |
| $X_k$          | 267.04    |                | 2.211      |

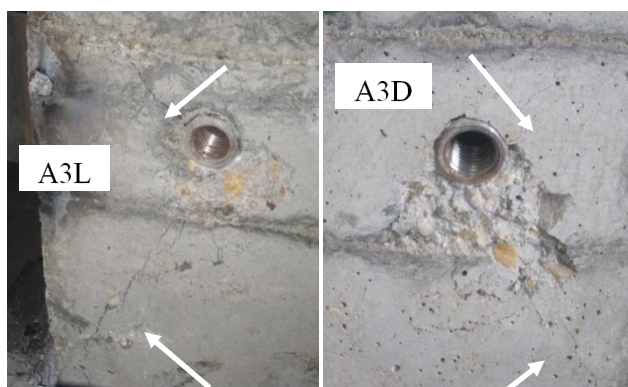


Granične vrednosti nosivosti i deformabilnosti za seriju A prikazana je u tabeli 3.8. Krive srednjih vrednosti dijagrama sila – vertikalno pomeranje ("slip") prikazane su na slici 3.30.



**Slika 3.30** Dijagram sila - pomeranje za seriju uzoraka A

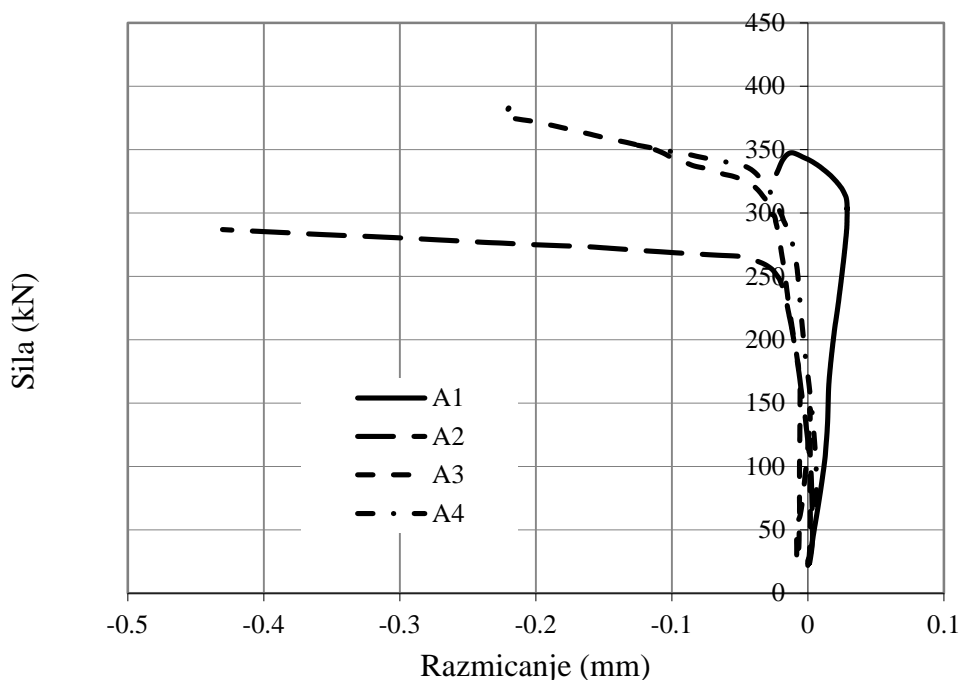
Kod krivih za uzorke A2 i A4 se može uočiti nešto drugačiji uzlazni deo krive, sa jasno izraženom granicom elastične i plastične oblasti. Kod ova dva uzorka je došlo do jasno izraženog loma usled blizine ivice betona (slika 3.29). Konektor u pukotini, ankerisan armaturom, preostalom nosivošću prihvata dalji prirast sile dok ne nastane lom zavrtnja na smicanje. Na uzorcima A1 i A3 lom usled blizine ivice manje je naglašen, a formirane su prsline u odgovarajućim pravcima od smičućeg konektora ka ivici (slika 3.31). Maksimalni izmereni orvor prsline na uzorku A3 je 0.3 mm



**Slika 3.31** Uzorak A3 posle ispitivanja do loma – kose prsline ka ivici betona

Kao što će biti detaljnije prikazano u sledećoj tački na seriji uzoraka B, betonsko telo koje se odvaljuje posle loma usled blizine ivice duboko je koliko i zaštitni sloj, dok unutrašnji deo preseka stuba utegnut uzengijama prihvata vertikalna naprezanja ispod smičućeg konektora i omogućava efikasno sidrenje armaturnog anker. Detaljna analiza ovakvog razvoja oštećenja data je u poglavlju 6.

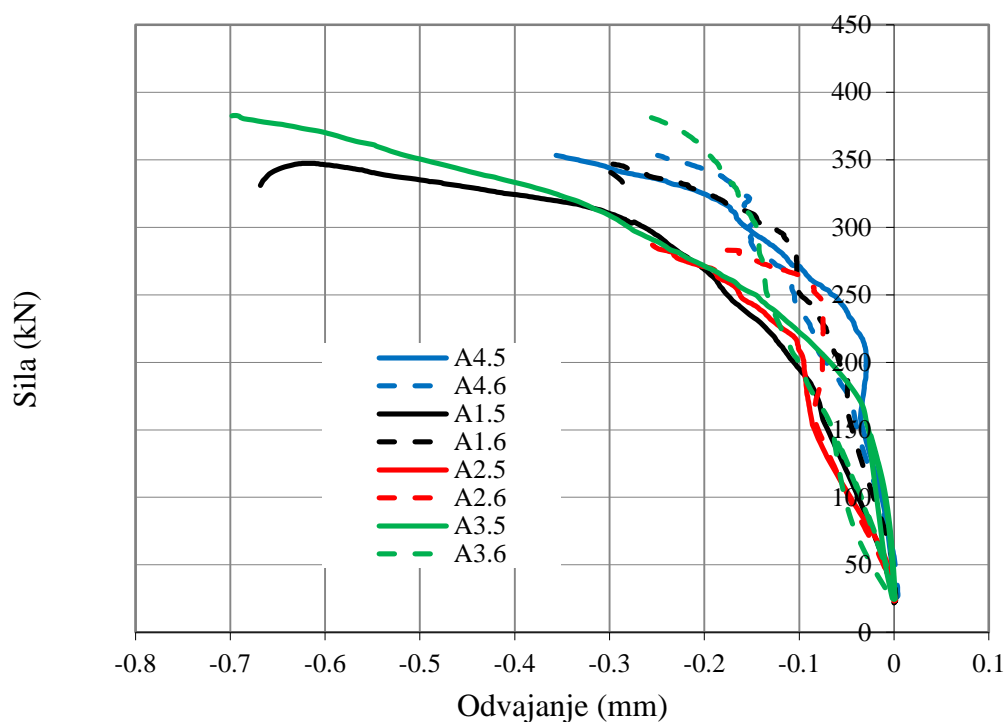
Na dijagramu sa slike 3.32 prikazano je razmicanje armiranobetonskih prizmi uzoraka serije A mereno na mernom mestu 7, prema dispoziciji mernih mesta na slici 3.24.



**Slika 3.32** Dijagram sila – razmicanje AB prizmi za seriju A

Prikazana razmicanja su međusobno različita, što je pokazuje da uslovi oslanjanja elemenata na podlogu nisu indentični. Iako je oslanjanje izvedeno preko sloja gipsa, tolerancije u dimenzijama i ravnosti površina montažnih AB prizmi uticale su na rasipanje rezultata. Na slici 3.33 prikazan je dijagram odvajanja čeličnog profila i betonskih prizmi u nivou konektora.

Na osnovu prikazanih rezultata merenja razmicanja stubova i odvajanja čeličnog profila od betona može se zaključiti da su veličine ovih pomeranja male, a njihove međusobne razlike posledica tolerancije dimenzija i ravnosti površina AB elemenata.



Slika 3.33 Dijagram sila – odvajanje čeličnog profila od AB prizmi za seriju A

### 3.5.2 Rezultati ispitivanja uzoraka serije B

Seriya B se od serije A razlikuje po količini poprečne armature u armiranobetonskim prizmama. Za razliku od serije A, gde su stubovi armirani uzengijama Ø8/11, stubovi serije B su armirani uzengijama Ø10/11, sa progušćenjem u zoni konektora na Ø10/5.5. S obzirom na srednju čvrstoću betona pri pritisku  $f_{cm}=26.86\text{MPa}$  i ostale geometrijske karakteristike uzorka (tabela 3.1), poprečna armatura je predstavljala jedinu razliku između serija A i B. Kao i kod serije A, pre konačnog otkaza zavrtnjeva na smicanje dogodio se lom usled blizine ivice betona u zoni zaštitnog sloja, osim kod serije B2, gde nije došlo do loma zavrtnja na smicanje, već je otkaz nastupio usled loma betona u blizini ivice. Na uzorku B3, prikazanom na slici 3.34, vide se po dve karakteristične pukotine, maksimalnog otvora od 1.6 mm, koje se pod uglom pružaju od konektora prema ivici betona. Lom smičuće veze nastaje pri iscrpljenju nosivosti zavrtnja na smicanje. Kao i kod uzoraka serije A, prisutno je oljuskavanje površinskog sloja betona u zoni ispod smičućeg konektora.

Prilikom loma zavrtnjeva, oba zavrtnja na levoj AB prizmi uzorka (B3L) su pukla na smicanje, dok se na zavrtnjima na drugoj prizmi uzorka (B3D) vidi naglašena deformacija, u najvećoj meri usled smicanja, a donekle i savijanja.



**Slika 3.34** Uzorak B3 posle ispitivanja do loma

Lom betona usled blizine ivice je ograničen na zaštitni sloj betona, kao što se može videti na slici 3.35. Na detalju u sredini se vidi pukotina u betonu snimljena sa boka, nastala u toku nanošenja opterećenja, a na detalju desno uzorak sa odvaljenim delom betona na ivici stuba, u debljini zaštitnog sloja, na kome se može uočiti otkrivena uzengija ispod smičućeg konektora, koja obuhvata utegnuti deo preseka.

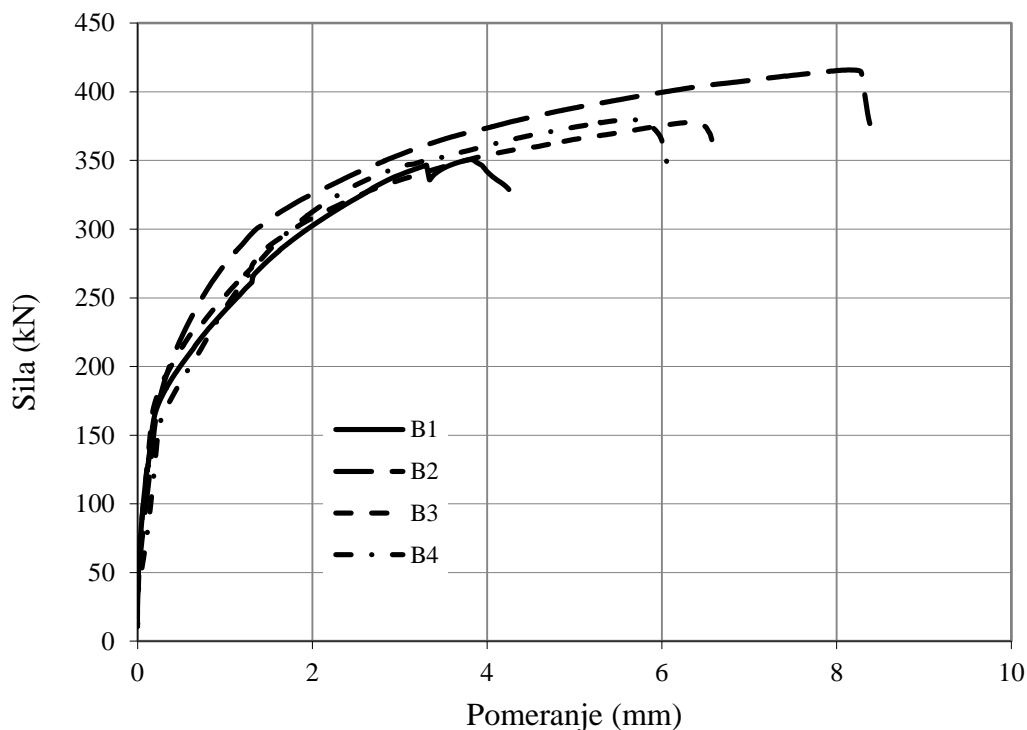


**Slika 3.35** Detalji loma uzorka B2 usled blizine ivice betona

Granične vrednosti nosivosti i pomeranja za seriju B prikazane su u tabeli 3.9, a dijagram sila vertikalno pomeranje prikazan je na slici 3.36. Krive za pojedine uzorke po obliku se poklapaju, granične sile i pomeranja se razlikuju. Razlika u graničnim pomeranjima (relativnim vertikalnim pomeranjima flanše u odnosu na AB prizmu) je posebno izražena.

**Tabela 3.9** Granične sile i pomeranje za seriju uzoraka B

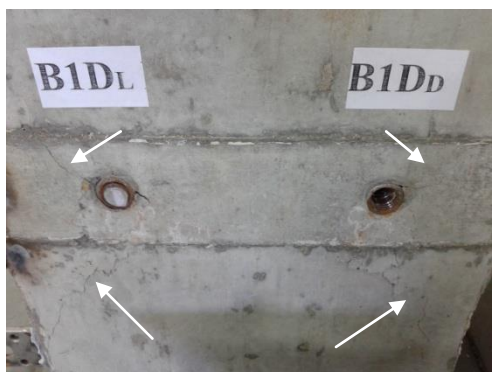
|           | $P_{ult}$ | $\delta_{ini}$ | $\delta_u$ |
|-----------|-----------|----------------|------------|
|           | kN        | mm             | mm         |
| B1        | 350.70    | 1.474          | 4.305      |
| B2        | 415.95    | 1.285          | 8.594      |
| B3        | 340.02    | 1.527          | 6.938      |
| B4        | 341.67    | 0.616          | 6.071      |
| Srednja   | 362.08    | 1.226          | 6.477      |
| $s_x$     | 36.22     |                | 1.787      |
| $V_x$ (%) | 10.00     |                | 27.585     |
| $X_k$     | 266.84    |                | 1.778      |



**Slika 3.36** Dijagram sila – pomeranje za seriju uzoraka B

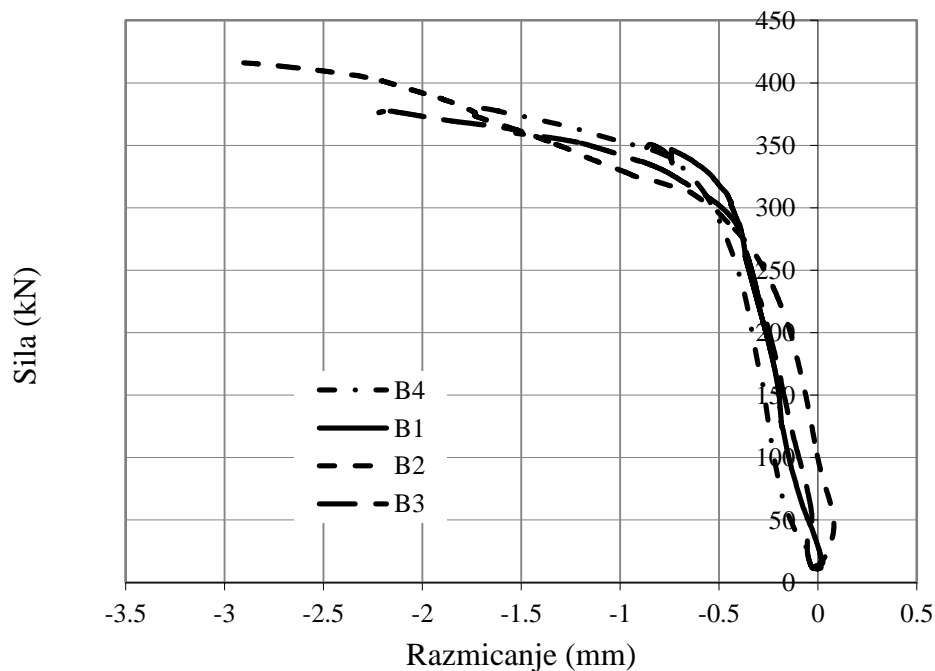
Razlika u izmerenim maksimalnim silama i pomeranjima proističe iz različitog nivoa oštećenja preseka u blizini ivice betona. Kod uzorka B1 (slika 3.37), oštećenja su manja, a kod uzorka B2 (slika 3.35) najveća. Pri manjem otvoru prslina ili pukotina

prema ivici betona manja su i vertikalna pomeranja, odnosno klizanja smičuće veze. S druge strane, pri manjim klizanjima zavrtnaj dostiže lom dominantno smicanjem, dok pri većim klizanjima dolazi i do zakretanja konektora na dole, pojave aksijalnog zatezanja i efekta lančanice, tako da je lom zavrtnja kombinacija smicanja, zatezanja i savijanja, što rezultuje većom graničnom nosivošću. Sličan mehanizam je pokazao [Pavlović 2014] na smičućoj vezi sa ubetoniranim zavrtnjevima.

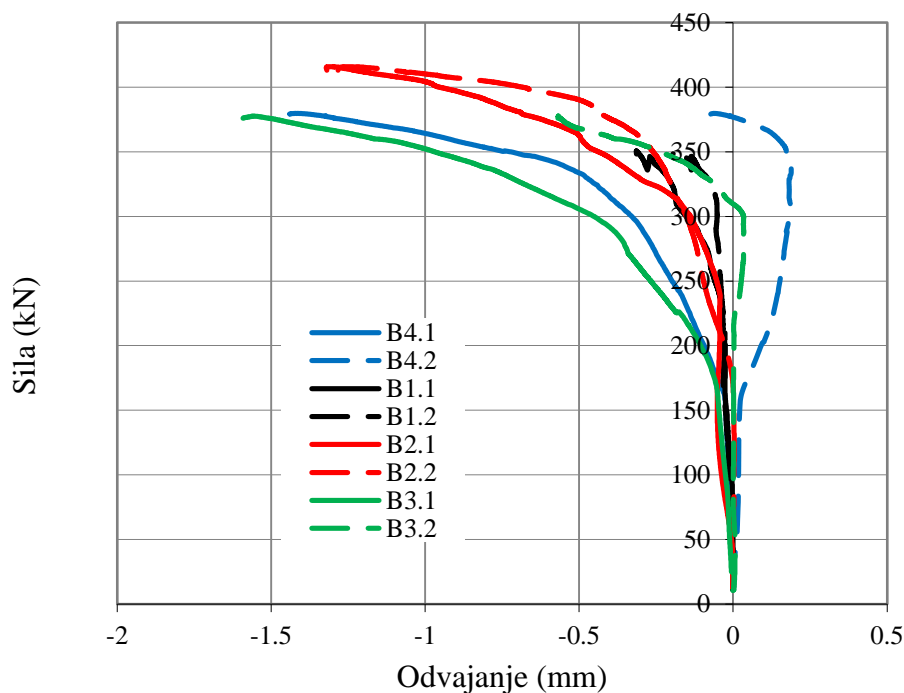


**Slika 3.37** Uzorak B1 posle ispitivanja do loma – kose prsline ka ivici betona

Horizontalna razmicanja AB prizmi su prikazana na slici 3.38 a odvajanje čeličnog profila od površine betona na slici 3.39.



**Slika 3.38** Dijagram sila – razmicanje AB stubova za seriju B



**Slika 3.39** Dijagram sila – odvajanje čeličnog profila od AB stubova za seriju B

Na uzorcima serije B su zabeležena veća razmicanja nego u seriji A, što je posledica korišćenja suvog maltera umesto gipsa za podlogu stubova, sa nešto elastičnijim karakteristikama. Na dijagramu 3.39, za uzorak B4, i u manjoj meri za B3, može se primetiti nesimetrija merernih rezultata na mestima 5 i 6, što je posledica nesimetrije uzorka, nastale zbog već pomenute tolerancije u dimenzijama prefabrikovanih elemenata koji su betonirani u realnim uslovima, u drvenoj oplati i sa uobičajenim načinom ugradnje.

Treba naglasiti da, i pored navedenih razlika između serije uzoraka A i B u načinu armiranja i razlici u horizontalnoj krutosti podloge, su dobijeni veoma slični rezultati u izmerenoj nosivosti i maksimalnom vertikalnom pomeranju.

### 3.5.3 Rezultati ispitivanja uzoraka serije C

Uzorci serije C se od prethodnih serija (tabela 3.1) razlikuju po rastojanju smičućih konektora od ivice betona, koja iznosi  $c = 10\text{cm}$ , i srednjoj čvrstoći betona pri pritisku  $f_{cm} = 37.72\text{ MPa}$  (tabela 3.2). Svi uzorci serije su lom dostigli otkazivanjem jednog ili dva zavrtnja na smicanje. Na uzorcima nije došlo do loma usled blizine ivice betona, čak ni nastanka karakterističnih kosih prslina od konektora ka ivici. Na slici



3.40 prikazan je uzorak C2 posle ispitivanja do loma. Što se oštećenja betona tiče, može se uočiti karakteristično oljuskavanje betona ispod smičućeg konektora (slika 3.41).



**Slika 3.40** Uzorak C2 posle ispitivanja do loma



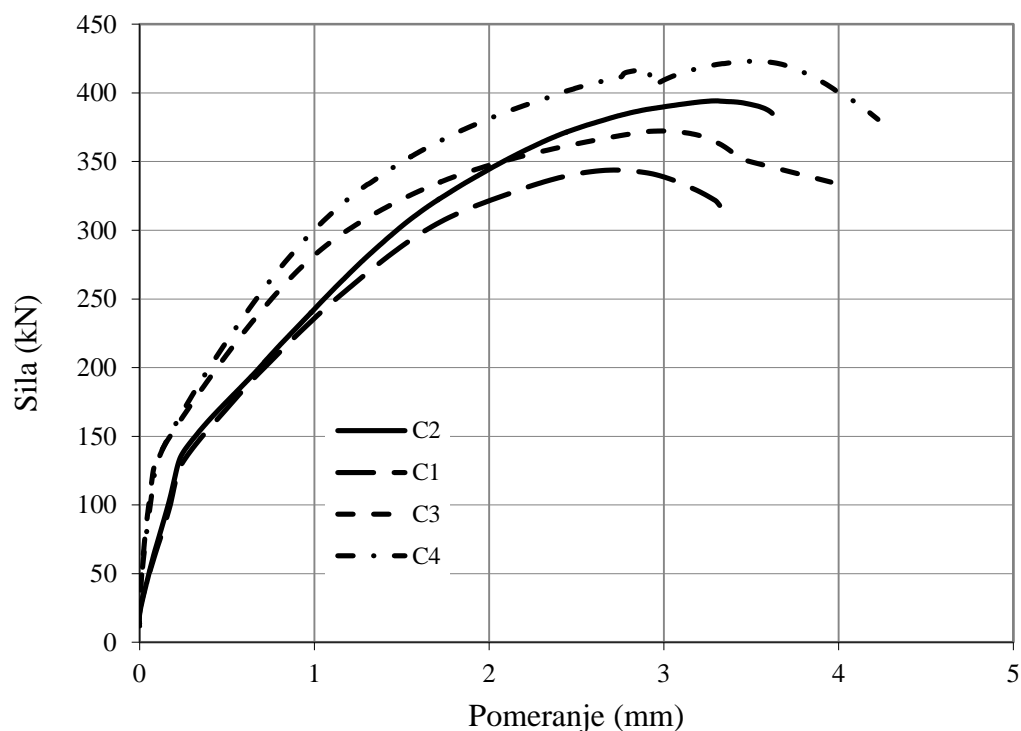
**Slika 3.41** Uzorak C2 – detalj oljuskavnja betona ispod smičućeg konektora

Granične vrednosti nosivosti i pomeranja za uzorke serije C prikazana je u tabeli 3.10, a dijagram sila - vertikalno pomeranje prikazan je na slici 3.42.

**Tabela 3.10** Granične sile i pomeranje za uzorke seriju uzoraka C

|           | $P_{ult}$ | $\delta_{ini}$ | $\delta_u$ |
|-----------|-----------|----------------|------------|
|           | kN        | mm             | mm         |
| C1        | 343.84    | 1.237          | 3.355      |
| C2        | 394.23    | 0.987          | 3.708      |
| C3        | 372.23    | 0.694          | 3.956      |
| C4        | 423.07    | 0.674          | 4.225      |
| Srednja   | 383.34    | 0.898          | 3.811      |
| $s_x$     | 33.57     |                | 0.370      |
| $V_x$ (%) | 8.76      |                | 9.712      |
| $X_k$     | 295.06    |                | 2.838      |





**Slika 3.42** Dijagram sila - pomeranje za seriju uzoraka C

### 3.5.4 Rezultati ispitivanja uzorke serije D

Uzorke serije D, kao što je prikazano u tabeli 3.1, karakteriše dimenzija armiranobetonske prizme u osnovi  $b \times d = 400 \times 300$  mm, visine 550 mm. Oso rastojanje smičućeg konektora u odnosu na ivicu betona iznosi  $c = 150$  mm, i srednja čvrstoća betona pri pritisku iznosi  $f_{cm} = 32.58$  MPa. Razlika u odnosu na uzorke prethodne serije je i u većoj dužini zavrtnja i mehaničke spojnice, kao što je prikazano u tabela 3.1.

Svi uzorci serije su lom dostigli otkazivanjem jednog ili dva zavrtnja na smicanje. Na uzorcima nije došlo do loma usled blizine ivice betona Na slici 3.43 prikazan je uzorak D3 posle ispitivanja do loma. Oba zavrtnja na desnoj strani uzorka su doživela lom na smicanje, dok su zavrtnjevi sa druge strane uzorka značajno deformisani smicanjem.

Granične vrednosti nosivosti i pomeranje za seriju D prikazana je u tabeli 3.11. Pri ispitivanju uzoraka ove serije dobijena su najbolja poklapanja u nosivosti smičućeg spoja, sa koeficijentom varijacije od samo 3.69%.



**Slika 3.43** Uzorak D3 posle ispitivanja do loma

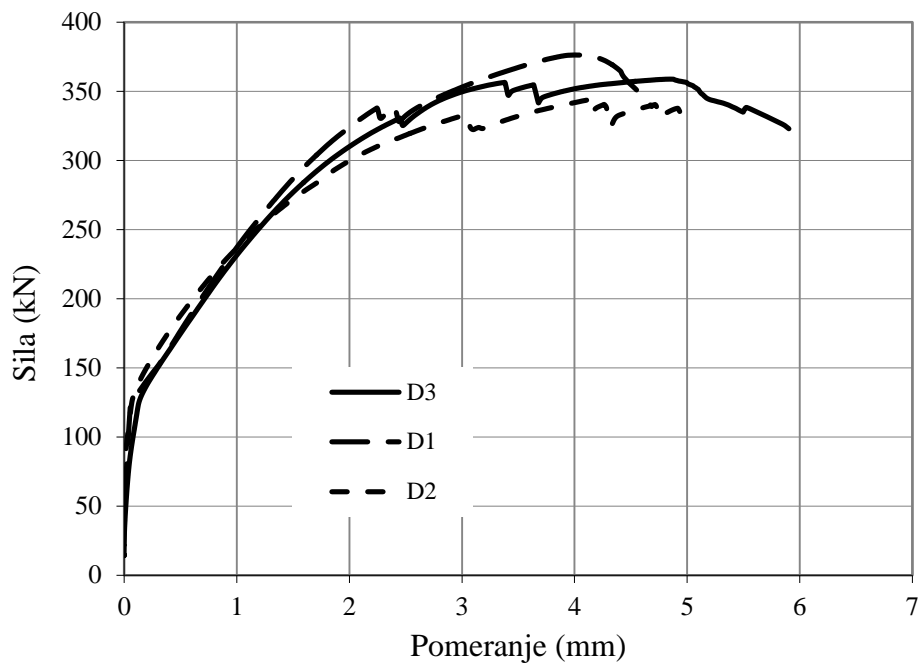


**Slika 3.44** Uzorak D3 – detalj oljuskavnja betona ispod smičućeg konektora

**Tabela 3.11** Granične sile i pomeranje za seriju uzoraka D

|           | $P_{ult}$ | $\delta_{ini}$ | $\delta_u$ |
|-----------|-----------|----------------|------------|
|           | kN        | mm             | mm         |
| D1        | 376.29    | 0.845          | 4.689      |
| D2        | 343.78    | 1.288          | 5.076      |
| D3        | 358.84    | 1.028          | 5.904      |
| Srednja   | 359.64    | 1.054          | 5.223      |
| $s_x$     | 13.28     |                | 0.507      |
| $V_x$ (%) | 3.69      |                | 9.703      |
| $X_k$     | 324.70    |                | 3.890      |

Dijagram sila vertikalno pomeranje za uzorke serije D je na slici 3.45.



Slika 3.45 Dijagram sila - pomeranje za seriju uzoraka D

### 3.5.5 Rezultati ispitivanja uzoraka serije E

Uzorci serije E se od serije D razlikuje po prečniku zavrtnja (M20, umesto M16), dimenziji mehaničke spojnice i prečniku ankera ( $\varnothing 16$ ), kao što je prikazano u tabeli 3.1. Položaj smičućeg konektora u odnosu na ivicu betona je određen rastojanjem  $c = 150$  mm, a srednja čvrstoća betona pri pritisku iznosi  $f_{cm} = 39.41$  MPa.

Svi uzorci serije E su lom dostigli otkazivanjem jednog ili dva zavrtnja na smicanje. Na slici 3.46 prikazan je uzorak E1 posle ispitivanja do loma.



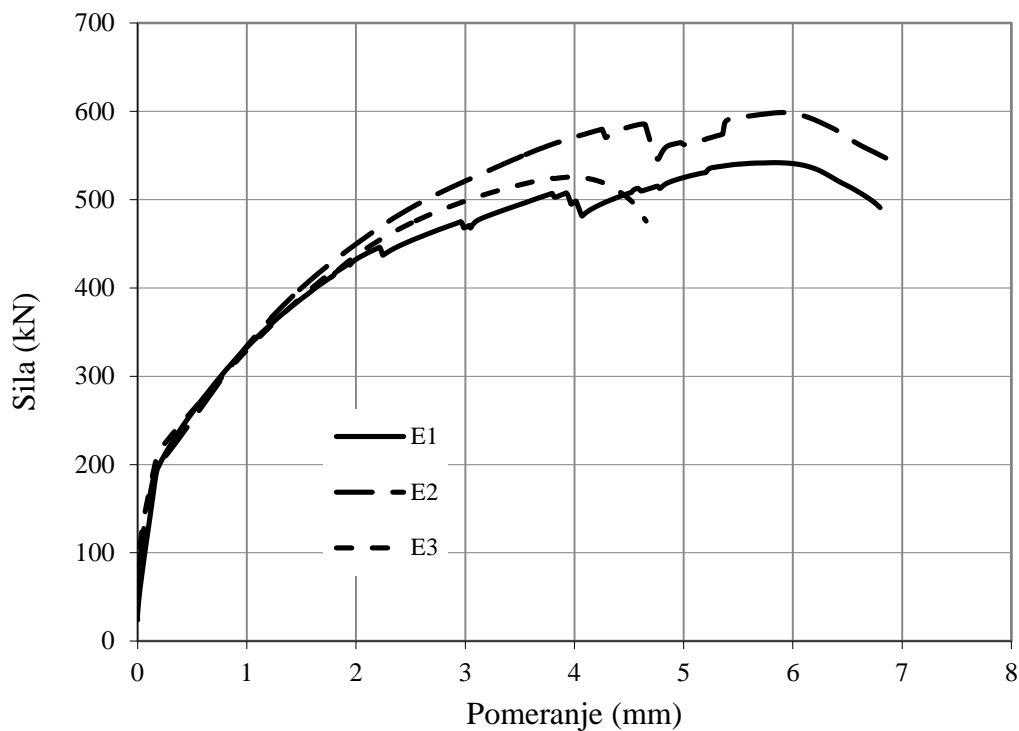
Slika 3.46 Uzorak E1 posle ispitivanja do loma

Granične vrednosti nosivosti i pomeranja za seriju E prikazana je u tabeli 3.12.

**Tabela 3.12** Granične sile i pomeranje za seriju uzoraka E

|           | $P_{ult}$ | $\delta_{ini}$ | $\delta_u$ |
|-----------|-----------|----------------|------------|
|           | kN        | mm             | mm         |
| E1        | 541.92    | 1.230          | 7.201      |
| E2        | 598.67    | 0.930          | 6.983      |
| E3        | 525.76    | 1.388          | 4.670      |
| Srednja   | 555.45    | 1.183          | 6.285      |
| $s_x$     | 43.12     |                | 1.980      |
| $V_x$ (%) | 7.76      |                | 31.498     |
| $X_k$     | 442.05    |                | 1.078      |

Dijagram sila vertikalno pomeranja za seriju uzoraka E prikazan je na slici 3.47.



**Slika 3.47** Dijagram sila – pomeranje za seriju uzoraka E

### 3.5.6 Oštećenja mehaničkih spojnica

Nakon ispitivanja uzoraka do loma, na pojedinim mehaničkim spojnica su uočena oštećenja u obliku pukotina na jednom ili oba zida spojnice (slika 3.48). Ovakva oštećenja su primećena na uzorcima iz svake serije A do E. Od ukupnog broja od 72 ugrađene mehaničke spojnice, na 10 spojnica su primećena oštećenja, što predstavlja 13.8% od ukupnog broja.



**Slika 3.48** Oštećenja mehaničkih spojnica na ispitivanim uzorcima

Pukotine na zidu mehaničke spojnice propagiraju do približno polovine dužine spojnice, što je utvrđeno vađenjem oštećenih spojnica iz ispitivanih uzoraka (slika 3.49). Oštećenja zidova spojnica su se pojavila uglavnom na onim smičućim konektorima kod kojih nije došlo do loma zavrtnja na smicanje, već samo do izražene deformacije zavrtnjeva, osim u slučaju smičućeg konektora A1Dd kod kog je došlo do loma zavrtnja na smicanje (slika 3.50).





**Slika 3.49** Oštećena mehanička spojnica izvađena iz ispitivanog uzorka

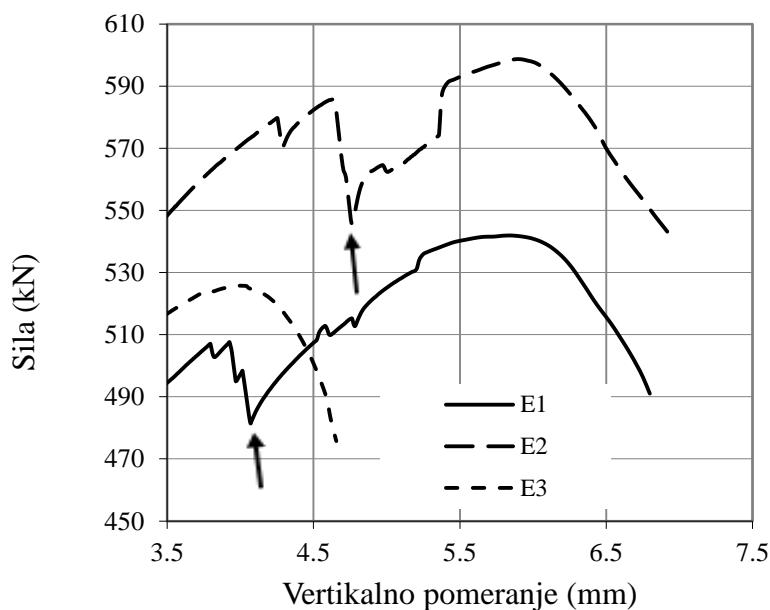
Prikazana oštećenja nastaju usled pojave visokih napona zatezanja u zidu mehaničke spojnice upravno na njenu osu. Prilikom dostizanja smičuće sile u konektoru koja je bliska njegovoj nosivosti, beton ispod dela mehaničke spojnice je u stanju visoke plastifikacije usled visokih lokalnih napona pritiska, i više ne predstavlja oslonac za spojnicu. Radi se o betonu zaštitnog sloja AB prizme uzorka, odnosno dela spojnice uz ivicu preseka prizme.



**Slika 3.50** Primer oštećene mehaničke spojnice posle loma zavrtnja na smicanje  
(Uzorak A2)

Smičuća sila koja se preko zavrtnja prenosi na spojnicu, izaziva velika vertikalna zatezanja u zidovima spojnice, pa su naponi u nekim ispitivanim uzorcima, i dostigli čvrstoću čelika na zatezanje, i dovela do pucanja zida spojnice.

Uticao oštećenja mehaničkih sponica se može videti i na dijagramima sila – vertikalno pomeranje u obliku trenutnog pada sile posle koga se nastavlja prirast sile i pomeranja. Ovaj se efekat može uočiti kao poremećaj na krivama za uzorke A2 i A4 (slika 3.30), B1 (slika 3.36), C4 (slika 3.42), D1 i D2 (slika 3.45), kao i E1 i E2 (slika 3.47). Efekat pucanja mehaničkih spojnica na uzorcima E1 i E2 prikazan je na slici 3.51 u krupnijoj razmeri. Strelicama su označena mesta na dijagramima koja odgovaraju pojavi prslina u zidovima mehaničkih spojnica tokom ispitivanja ovih uzoraka do loma.



**Slika 3.51** Efekat oštećenja mehaničke spojnice na dijagramu sila – vertikalno pomeranje

### 3.6 Analiza eksperimentalnih rezultata

#### 3.6.1 Način loma ispitivanih uzoraka

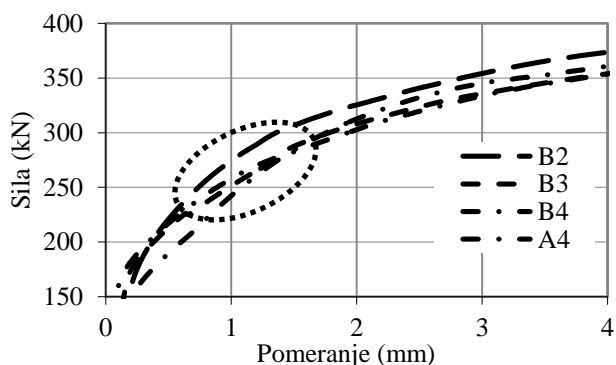
Na osnovu prezentiranih rezultata eksperimentalnih istraživanja u okviru ove teze mogu se uočiti jasne razlike u ponašanju i načinu dostizanja graničnog stanja dve grupe uzoraka. Prvu grupu čine uzorci serije A i B, kod kojih se prvo pojavio lom usled blizine ivice, a zatim, u najvećem broju slučajeva, i otkaz jednog ili više zavrtnjeva na

smicanje. Drugu grupu, u koju spadaju uzorci serije C, D i E, odlikuje lom zavrtnjeva na smicanje, bez znakova oštećenja u vidu kosih pukotina usled blizine ivice. Razlika u ponašanju ove dve grupe, posledica je, pre svega, različitog osnovnog rastojanja smičućih konektora od ivice betona  $c$ , a zatim i različite čvrstoće betona pri pritisku. Na 13 % smičućih konektora je došlo do oštećenja (pucanja) zida mehaničke spojnice, što nije u značajnoj meri uticalo na nosivost i maksimalno pomeranje samog spoja ispitivanih uzoraka.

**Tabela 3.13** Parametri koji utiču na način loma ispitivanih uzoraka

|                | Lom usled blizine ivice |       | Lom smicanjem zavrtnja |       |       |
|----------------|-------------------------|-------|------------------------|-------|-------|
|                | A                       | B     | C                      | D     | E     |
| $f_{cm}$ (MPa) | 26.60                   | 26.86 | 37.72                  | 32.58 | 39.41 |
| $c$ (mm)       | 75                      | 75    | 100                    | 150   | 150   |

Lom usled blizine ivice po obliku karakteriše pojava kosih prslina betona ispred i iza smičućeg konektora (gledano u pravcu delovanja opterećenja). Ove prsline se pružaju od konektora prema ivici pod uglom  $\alpha$  i  $\beta$ , kao što je prikazano u tački 1.5.1. Prsline su različite širine, sve do pukotina otvora preko 1mm, praćene pojavom odvaljivanja delova betona. Treba naglasiti da se ova oštećenja javljaju samo u debljini zaštitnog sloja. Ukoliko se ovaj oštećeni sloj ukloni, nakon ispitivanja kada je vršen detaljni vizuelni pregled jezgra utegnuto uzengijama, ne uočavaju se druga oštećenja u okolnom unutrašnjem betonu. Sledi da je mehanička spojnica, deo smičućeg konektora, jednim svojim delom (od uzengije ka unutrašnjosti preseka), i posle pojave loma betona u zaštitnom sloju, okružena betonom dovoljne preostale nosivosti, preko koga se prenosi naprezanje, što objašnjava dalji prirast sile do konačnog loma zavrtnja na smicanje.



**Slika 3.52** Dijagram sila - pomeranje : zona pada krutosti – lom betona u blizini ivice



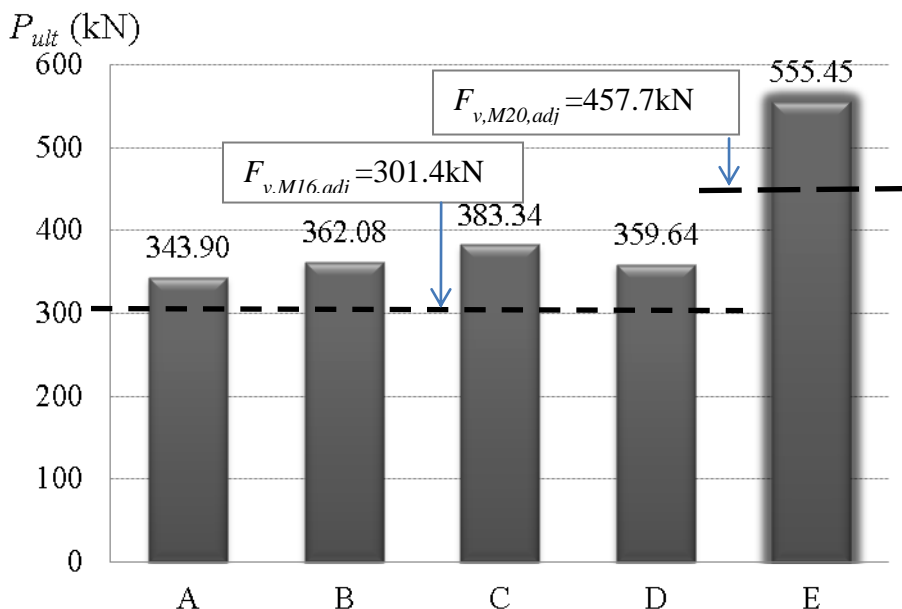
Nastanak oštećenja usled blizine ivice može se uočiti na dijagramu sila – vertikalno pomeranje u padu krutosti praćenom promenom nagiba krivih (slika 3.52). Ovakav transvers opterećenja sa betona u zaštitnom sloju ka utrašnjosti preseka detaljnije će biti analiziran u poglavlju 6, posle numeričke analize.

### 3.6.2 Nosivost ispitivanih smičućih konektora

Nosivost smičućih konektora, kao i maksimalna vertikalna pomeranja pri lomu  $\delta_u$ , prikazana su za sve serije u tabeli 3.14, i na slikama 3.53 i 3.54.

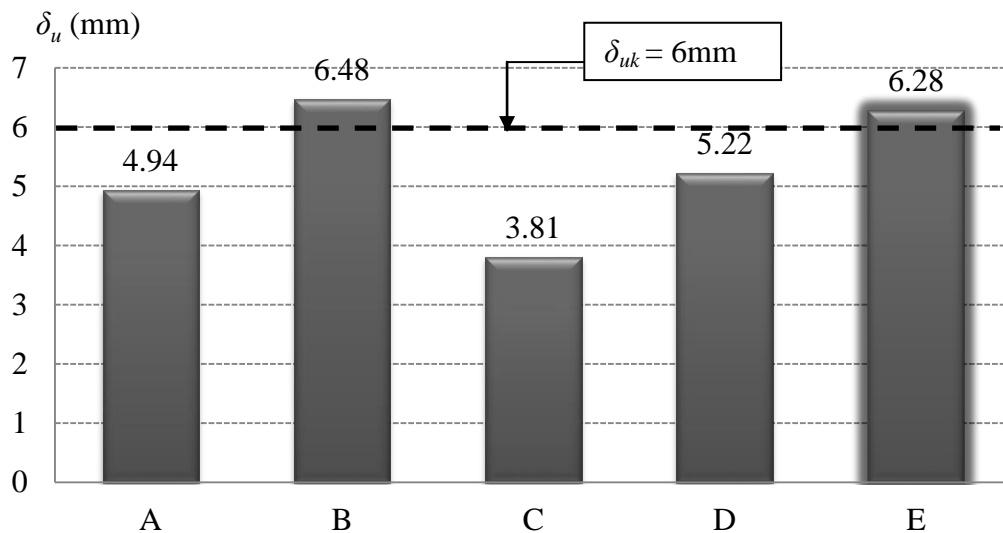
**Tabela 3.14** Nosivost i maksimalna pomeranja po serijama

|                 | A      | B      | C      | D      | E      |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Zavrtnaj        | M16    | M16    | M16    | M16    | M20    |
| $P_{ult}$ (kN)  | 343.90 | 362.08 | 383.34 | 359.64 | 555.45 |
| $\delta_u$ (mm) | 4.94   | 6.48   | 3.81   | 5.22   | 6.28   |



**Slika 3.53** Srednja nosivost smičuće veze za ispitivane serije uzoraka

Na dijagramu na slici 3.53 isprekidanim linijama su prikazane računске vrednosti nosivosti na smicanje četiri zavrtnja M16 i M20, za odgovarajući kvalitet čelika, prema [EC3, 2005], izraz 3.9. Ove vrednosti su, kao što se očekivalo, manje od izmerenih nosivosti za sve serije. Razlozi, u najvećoj meri, leže u činjenici da se na uzorcima lom zavrtnjeva ne dešava čistim smicanjem, kao i da se javlja trenje između čeličnog profila i delova površine armiranobetonskih prizmi.



**Slika 3.54** Srednja maksimalna vertikalna pomeranje smičućih veza za ispitivane serije uzoraka

Uzorci serija A i B međusobno se razlikuju po količini poprečne armature, i horizontalne krutosti oslonca (paragraf 1.5.2). Poprečna armatura je u zoni konektora veća ( $\text{Ø}10/55$  umesto  $\text{Ø}8/110$  mm), u cilju provere uticaja načina utezanja betonskog preseka na pojavu loma usled blizine ivice. S obzrom na način oštećenja uzoraka serije B, uticaj efekta dodatnog utezanja uzengijama je zanemarljiv, jer se oštećenja kod loma usled blizine ivice dešavaju isključivo u zaštitnom sloju betona. Uticaj horizontalne pomerljivosti oslonca, koja je veća kod uzoraka serije B u odnosu na seriju A, se jasno vidi u dijagramima horizontalnih razmicanja AB prizmi i odvajanja čeličnog profila od površine betona. Kod serije B ova su pomeranja znatno veća od serije A, što je rezultovalo i znatno većim vertikalnim pomeranjima smičućeg spoja (slika 3.54).

Veća vertikalna pomeranja pri dostizanju granične nosivosti, dovode do promene geometrije i nagiba ose konektora, pojave izraženijeg savijanja zavrtnja i spojnice i pojave efekta lančanice, koji prouzrokuje povećanje normalne sile zatezanja u svim elementima smičućeg konektora. Ova aksijalna naprezanja, uz dominantno smicanje, dodvode do složenog loma zavrtnja, što daje nešto veću nosivost same veze, nego u slučajevima loma zavrtnja na čisto smicanje [Pavlović 2014]. Složenom naponskom naprezanju zavrtnja doprinosi i povećanje vertikalnog pomeranja smičućeg konektora prilikom pojave prslina u zidovima mehaničke spojnice, gde dolazi do skokovite

promene nagiba ose zavrtnja, prirasta normalne sile i momenta savijanja u zavrtnju i time delimičnog povećanja nosivosti u odnosu na nosivost pri čistom smicanju, usled pojave složenog loma.

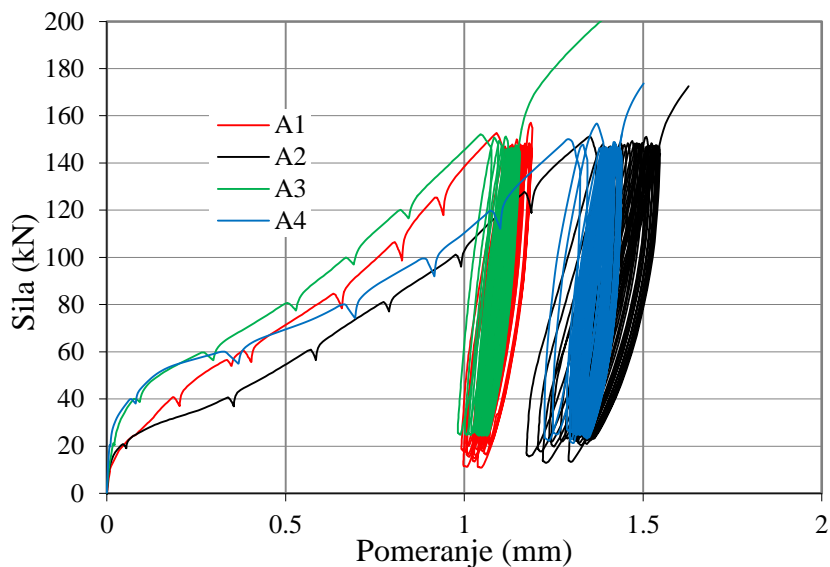
Međutim, veća odmicanja čeličnog profila od površine betona, daju manja trenja čelik-beton, pa se granična nosivost neznatno smanjuje. Konačno, ispitivana dispozicija je, u kombinaciji dva opisana efekta, dala nešto veće nosivosti kod serija B u odnosu na seriju A.

Kao što je prikazano u rezultatima eksperimentalnih ispitivanja uzoraka, kod uzoraka serija C, D i E nije bilo pojave loma betona usled blizine ivice. Uzorci sve tri serije su na podlogu oslonjeni preko sloja gipsa, na isti način kao i uzorci serije A. Kod uzoraka serija C, D i E marka betona je znatno veća nego kod uzoraka prethodnih serija, a i osno rastojanje smičućih konektora od ivice je veće i iznosi  $c \geq 100\text{mm}$  (videti tabelu 3.12). Uzorci serije C su pokazali najmanja vertikalna pomeranja, pa bi, pri lomu zavrtnja na čisto smicanje, granična nosivost trebalo da bude manja u odnosu na prethodne dve serije, što, prema merenjima, nije bio slučaj. Kod uzorka C4 je izmerena znatno veća granična nosivost i veće vertikalno pomeranje nego kod ostalih uzoraka serije C, što je doprinelo većoj srednjoj nosivosti za uzorke serije C. Na uzorku C4 je uočeno i oštećenje mehaničke spojnice, što može biti uzrok većih pomeranja i složenog loma zavrtnja, a time, uz efekte trenja, i razlog veće granične nosivosti. Kod uzoraka serije D, mehanička spojnica i zavrtnj su veće dužine, a kod uzoraka serije E zavrtnjevi su većeg prečnika.

### **3.6.3 Pomeranje i duktilnost ispitivanih smičućih veza**

Na osnovu prikazanih rezultata se može primetiti relativno veliko rasipanje rezultata kada je maksimalno vertikalno pomeranje veze u pitanju. Uzroci takvih rasipanja rezultata, u najvećoj meri, leže u različitom stepenu oštećenja uzoraka serija A i B pri lomu usled blizine ivice, čvrstoći betona na pritisak, načinu oslanjaja armiranobetonskih prizmi pri ispitivanju (horizontalna pomerljivost pri oslanjanju uzoraka na podlogu), kao i toleranciji u dimenzijama i ravnosti površina armiranobetonskih prizmi pojedinih uzoraka, o čemu je već bilo reči u paragrafu 3.6.2.

Kada je u pitanju ciklični deo opterećenja prilikom ispitivanja uzoraka, koji karakteriše pomeranje  $\delta_{ini}$ , definisano na slici 3.27, uočljivo je relativno veliko inicijalno klizanje između flanše i površine betona pri prvom ciklusu (primer: serija A, slika 3.56).



**Slika 3.56** Dijagram sila - pomeranje pri cikličnom opterećenju – serija uzoraka A

Ovakvo inicijalno pomeranje je posledica tolerancije rupa za zavrtnje čeličnom profilu, u odnosu na prečnik zavrtnja. Na ispitivanim uzorcima, zavrtnjevi M16 ugrađivani su u rupe prečnika 17 mm. S tim u vezi, dobijena inicijalna pomeranja se po veličini mogu uporediti sa vezama gde se koriste ubetonirani zavrtnji [Pavlović 2014], a znatno su veća nego kod zavarenih čeličnih moždanika sa glavom [Spremić 2013].

Duktilnost ispitivanih spojeva se može oceniti u skladu sa Evrokodom proropisanom granicom  $\delta_{uk} = 6$  mm [EC4, 2004]. Sa slike 3.54 se vidi da samo uzorci serije B, koju karakterišu velika oštećenja betona u blizini ivice, kao i uzorci serije E, sa prečnikom zavrtnja M20, zadovoljavaju propisani uslov.

## 4 Numerička analiza uspitivanih modela

### 4.1 Uvod

Nakon sprovedene eksperimentalne analize, koja je prikazana u prethodnom poglavlju, sledeći korak u ovom istraživanju je izrada odgovarajućih numeričkih modela, kako bi se sproveda analiza metodom konačnih elemenata. Numeričko modeliranje izvršeno je pomoću softverskog paketa ABAQUS, verzija 6.12 [ABAQUS, 2012] koji, nakon formiranja modela konačnih elemenata (u daljem tekstu "FE model" ili skraćeno "FEM"), omogućava analizu granične oblasti loma uz korišćenje nelinearnog ponašanja materijala sa oštećenjem ("damage plastic model"). FE model se formira tako da što približnije odgovara ispitivanim eksperimentalnim uzorcima, pre svega po geometriji i mehaničkim karakteristikama materijala, a zatim i po graničnoj nosivosti i deformacijama pri zadatom opterećenju. S tim u vezi, FE model treba kalibrisati prema eksperimentom dobijenim rezultatima, po svim relevantnim karakteristikama. Karakteristike koje najviše utiču na ponašanje su modeli komponentnih materijala, konturni i kontaktni uslovi, kao i način nanošenja opterećenja.

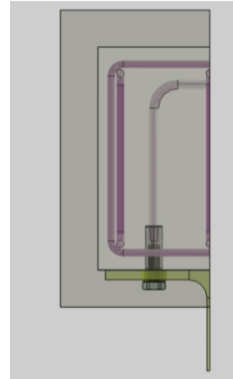
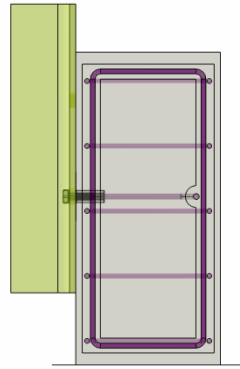
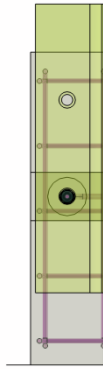
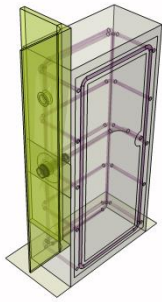
Jednom kalibrisan FE model, koji odgovara eksperimentalnim uzorcima, može se, pre svega, iskoristiti za detaljno sagledavanje razvoja uticaja i oštećenja u zoni konektora, a zatim i parametarsku analizu, u cilju utvrđivanja uticaja pojedinih relevantnih veličina (čvrstoća betona, prečnik zavrtnja, rastojanje od ivice betona, na pr.) na ponašanje i nosivost veze, o čemu će više reči biti u narednom poglavlju.

Za potrebe numeričke analize su formirana četiri FE modela koji odgovaraju serijama uzoraka koji su eksperimentalno ispitivani. S obzirom na relativno male razlike u mehaničkim karakteristikama materijala, graničnoj nosivosti i pomeranjima dobijenih ispitivanjem uzoraka A i B, formiran je jedinstveni model za ove dve serije uzoraka. Geometrijske karakteristike ispitivanih uzoraka, prema kojima su formirani FE modeli, date su u tabelama 3.1 i 3.2.

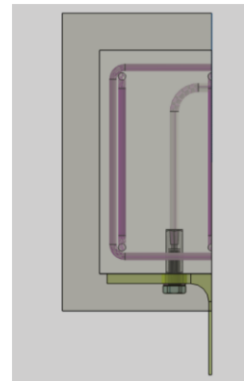
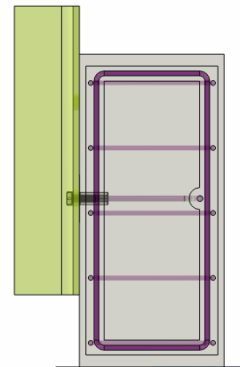
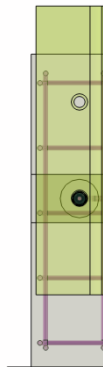
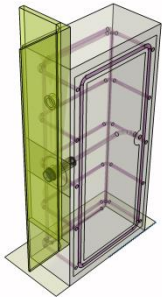
### 4.2 Dispozicija modela i granični uslovi

Ispitivani uzorci imaju dve ravni simetrije, pa se u cilju formiranja FE modela sa manjim brojem konačnih elemenata i bržeg proračuna, ovi FE modeli formiraju kao četvrtina uzorka sa odgovarajućim graničnim uslovima. Na slici 4.1 su prikazani, u aks-

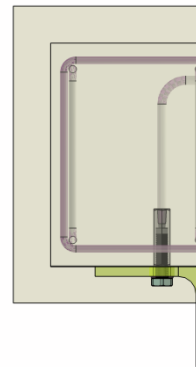
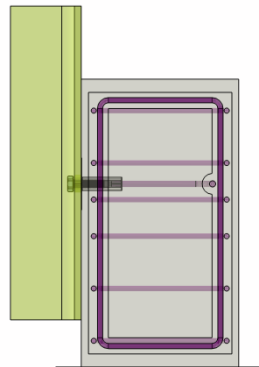
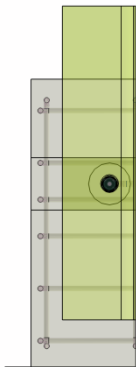
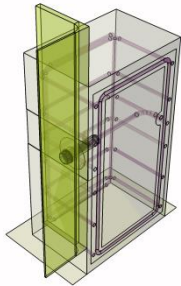
FEM\_A



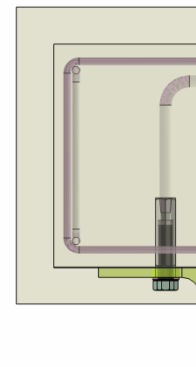
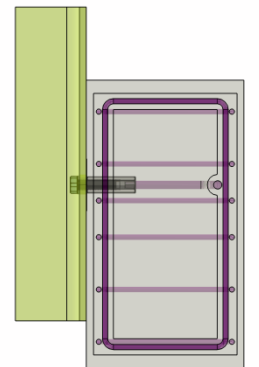
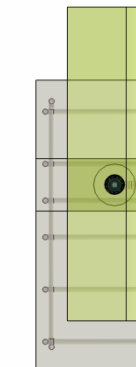
FEM\_C



FEM\_D

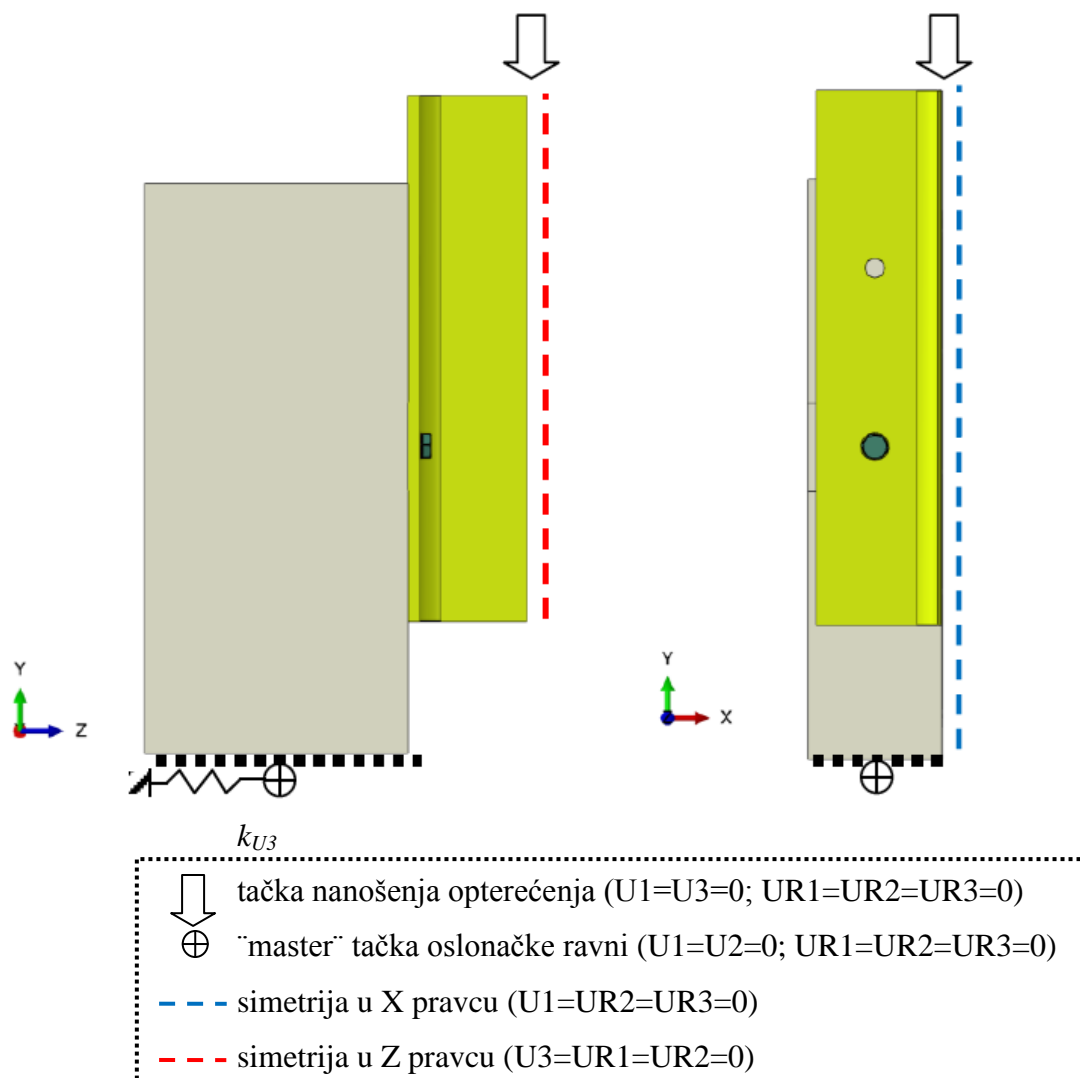


FEM\_E



Slika 4.1 FE modeli

onometriji i tri projekcije, modeli FEM\_A, koji odgovara eksperimentalnim uzorcima serija A i B, FEM\_C, FEM\_D i FEM\_E, koji odgovaraju eksperimentalnim uzorcima serija C, D i E respektivno. U ravnima simetrije su postavljeni granični uslovi koji odgovaraju uslovima simetrije u X i Z pravcu. Oslonačka ravan je modelirana preko jedne oslonačke "master" tačke koja opisuje pomeranje ove ravni kao krute. Granični uslovi su prikazani na slici 4.2.



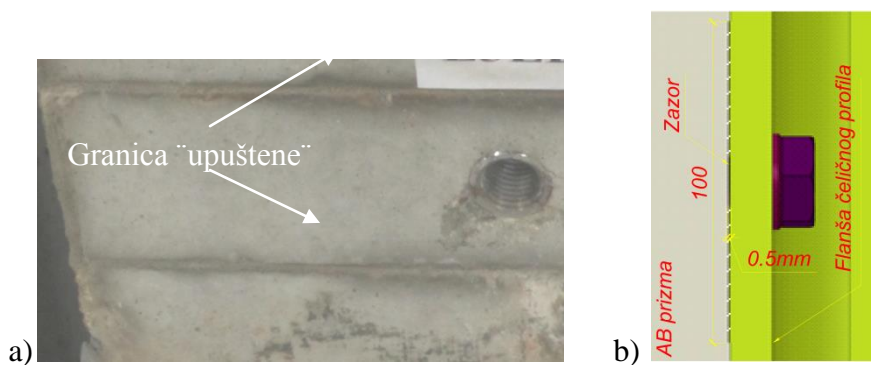
**Slika 4.2** Granični uslovi na modelu

Komponentalna pomeranja  $U_i$  i komponentalna obrtanja  $UR_i$  ( $i=1,2,3$ ) odgovaraju redom pravcima X, Y, Z. U oslonačkoj tački su oslobođena sva obrtanja, a sprečeno vertikalno pomeranje i pomeranje u X pravcu, dok je u Z pravcu definisan elastični oslonac krutosti  $K_{U3}=40$  kN/mm, kojim se modeliraju karakteristike sloja gipsa preko koga je, u fazi eksperimentalnog istraživanja, uzorak oslonjen na podlogu,

Vrednost usvojene krutosti oslonca, uz ostale uticaje, definiše horizontalno pomeranje oslonca u datom pravcu, i kalibrisana je prema rezultatima ekperimenta.

Kontakt između dva materijala definisan je karakteristikama u normalnom pravcu i tangencijalnom pravcu. U normalnom pravcu je usvojen je direktni dodir ("hard contact"), a u tangencijalnom je kontakt definisan preko trenja ("penalty friction"), sa koeficijentima trenja 0.14 za kontakt dve čelične površine, i 0.3 za kontakt čelika i betona. Koeficijent trenja usvojen za kontakt dve čelične površine, posebno je od značaja za vezu kontaktne površine zavrtnja i mehaničke spojnice, kao i spojnice i čelične flanše. Usvojene vrednosti su u skladu sa preporukama [ECCS, 1985]. Vrednost koeficijenta trenja između čelika i betona je od značaja jer, u cilju modeliranja realnog ponašanja veze, pri eksperimentalnom ispitivanju, trenje nije eliminisano premazima i sl.,. Usvojena vrednost koeficijenta trenja je dobijena kalibracijom modela prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja uzoraka.

Posebnu specifičnost eksperimentalno ispitivanih uzoraka serije D i E čini lokalno "upuštanje" površine betona na mestu ugrađenih konektora (slika 4.3a), koje je moguće primetiti na eksperimentalnim uzorcima. Ovo odstupanje površine betona u blizini konektora u odnosu na površinu ostatka betona je posledica umetanja dela oplata u vidu pločice sa rupama za konektore pri izradi uzoraka serija D i E. Na ovaj način je ista oplata korišćena za različite pložaje i prečnike ankera.



**Slika 4.3** Zazor između površine betona i čelične flanše

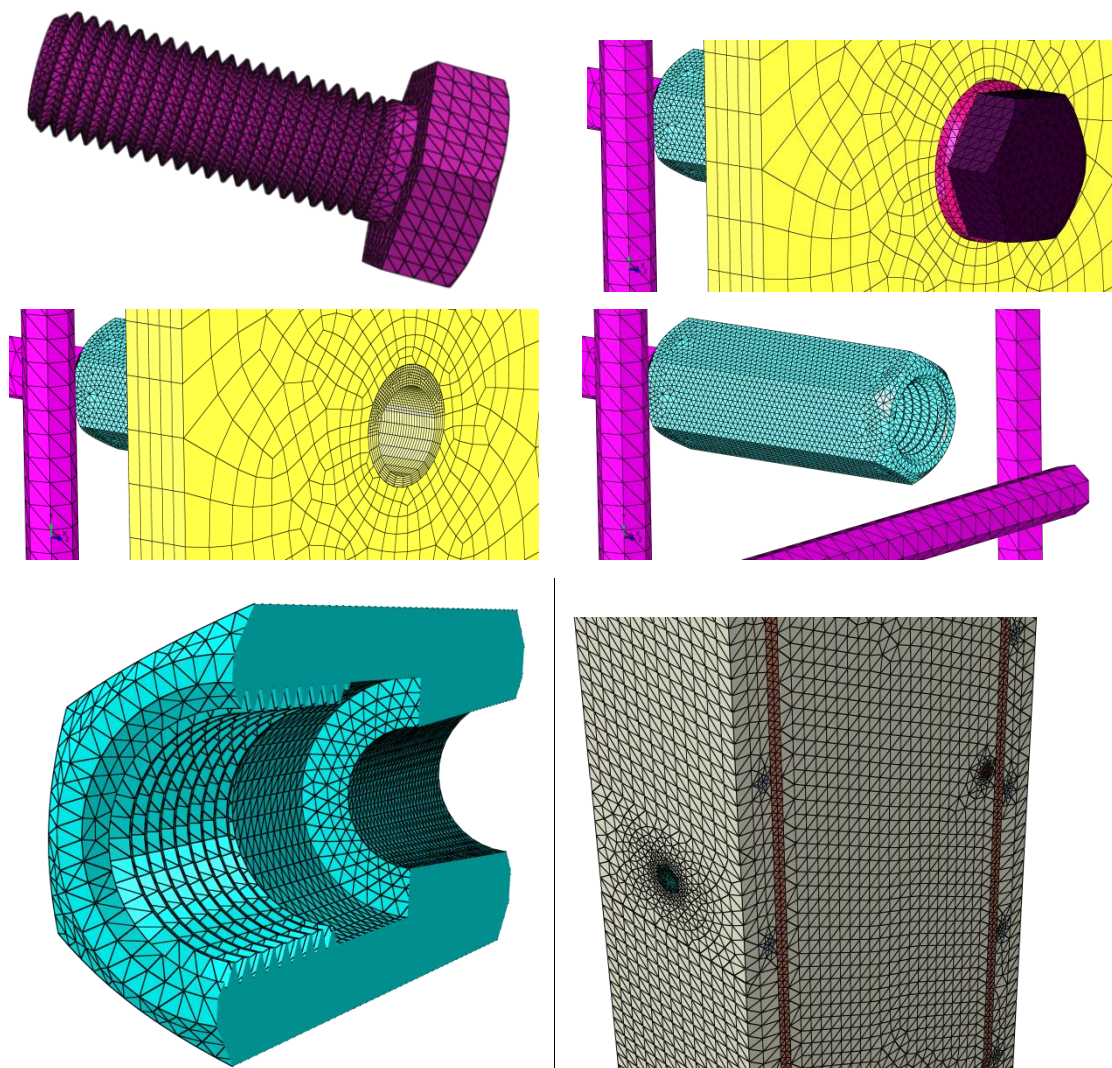
Pokazalo se da je, za preciznije modeliranje i kalibraciju FE modela, ovaj zazor između površine čelika i betona od značaja. Može se pokazati (poglavljje 6) da pomenuti zazor utiče na to da se efekat sprečenih bočnih deformacija betona pri pritisku u zoni neposredno ispod konektora pojavi kasnije (pri višim nivoima opterećenja).



Kalibracijom modela dobijeno je da zazor od 0.5 mm u FE modelu (slika 4.3b) najbolje odgovara ispitivanim uzorcima serija D i E.

### 4.3 Mreža konačnih elemenata

Tip i veličina konačnih elemenata odabrana je prema složenosti geometrije pojedinih delova modela (navoj na vezi zavrtnja i spojnice na primer) i potrebi da se modeliraju složena i usko lokalizovana naprezanja u čeliku i betonu (usecanje navoja zavrtnja u omotač rupe na čeličnoj flanši, ili lokalno naprezanje betona u zoni ispod spojnice, na primer) (slika 4.4). Tako su za čeličnu flanšu i okolinu rupe na flanši usvojeni heksaedarski konačni elementi C3D8R dimenzija 10 mm sa progušćenjem na elemente dimenzija 0.5mm u okolini rupe.



**Slika 4.4** Mreža konačnih elemenata – detalji

Za sve ostale elemente FE modela su usvojeni tetraedarski konačni elementi tipa C3D4, dimenzija 4.4 do 11.5 mm za beton, 4.5 mm za armaturu i armaturni anker, dok su zavrtnaj i spojnica modelirani elementima veličine 1.2 mm, sa progušćenjem na elemente minimalne dimenzije od 0.25 mm na samom navoju.

#### 4.4 Modeliranje materijala

##### 4.4.1 Čelik

Za elemente FE modela od čelika: zavrtnaj, spojnicu, anker, armaturu i čelični profil usvojeno je da je Poasonov koeficijent  $\nu=0.3$  i specifična masa  $\gamma=7850 \text{ kg/m}^3$ . Za spojnicu je usvojen modul elastičnosti  $E=195 \text{ GPa}$ , na osnovu podataka proizvođača, a za ostale elemente  $E=210 \text{ GPa}$ . Kao podloga za modeliranje ponašanja pojedinih materijala korišćene su eksperimentalne krive za zavrtnjeve, spojnice i armaturni anker prikazane u poglavlju 3, (slike 3.13, 3.14, 3.18 i 3.21). Za modeliranje ponašanja materijala u fazi loma korišćen je model progresivnog oštećenja ("progressive damage mode") u ABAQUS-u. Pošto je modelima plastičnog ponašanja materijala nemoguće definisati sliaznu granu dijagrama napon izduženje, potrebno je definisati naponske i deformacijske kriterijume nastanka oštećenja, kao i zakon razvoja oštećenja koji vodi do loma, odnosno trenutak sključenja pojedinih elementa FE modela iz proračuna.

Kriterijum nastanka, odnosno početka oštećenja, se definiše preko parametra prostornog stanja napona ("stress triaxiality"), za odgovarajuću vrednost plastične dilatacije. Ovaj parametar predstavlja odnos hidrostatičkog pritiska  $p$  i ekvivalentnog Mises-ovog napona  $\theta=p/q$ , gde je:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.1)$$

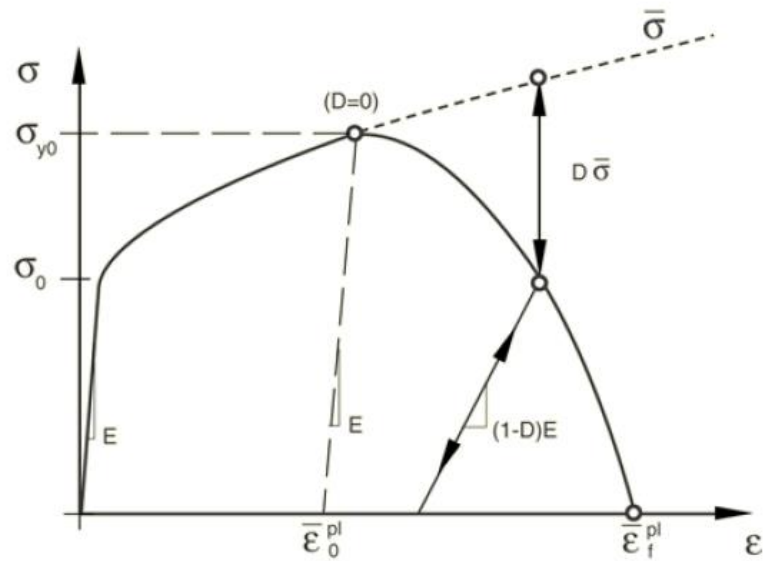
$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5} \quad (2.2)$$

gde su  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  glavni naponi.

Vrednost plastične dilatacije na početku oštećenja je dilatacija koja odgovara maksimalnoj vrednosti napona na dijagramu napon izduženje.

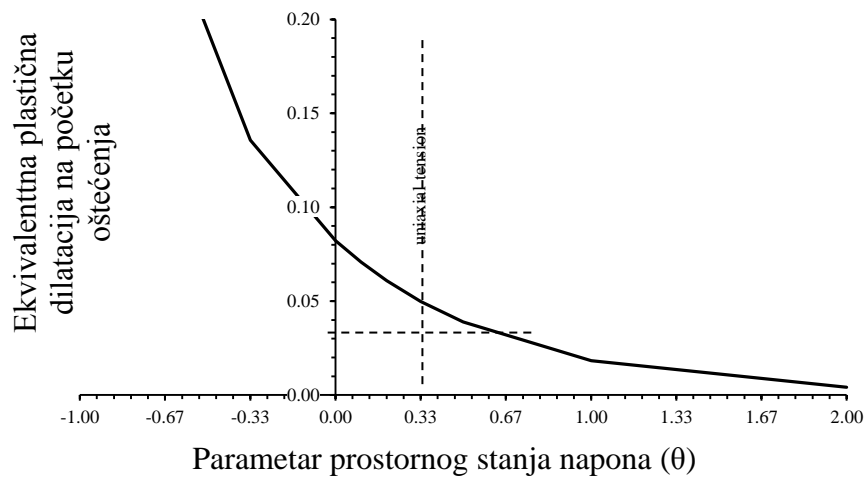
Zakon razvoja oštećenja je opisan je u ABAQUS-u modelom duktilnog oštećenja ("ductile damage model") čiji je princip prikazan na slici 4.5. Silazna grana dijagrama napon - izduženje je definisana preko parametra oštećenja  $D$  ("damage

variable“). Vrednost ovog parametra raste od 0, na početku oštećenja do maksimalne vrednosti  $D=1$ , koja odgovara potpunom oštećenju.



**Slika 4.5** Koncept modela duktilnog oštećenja [ABAQUS, 2012]

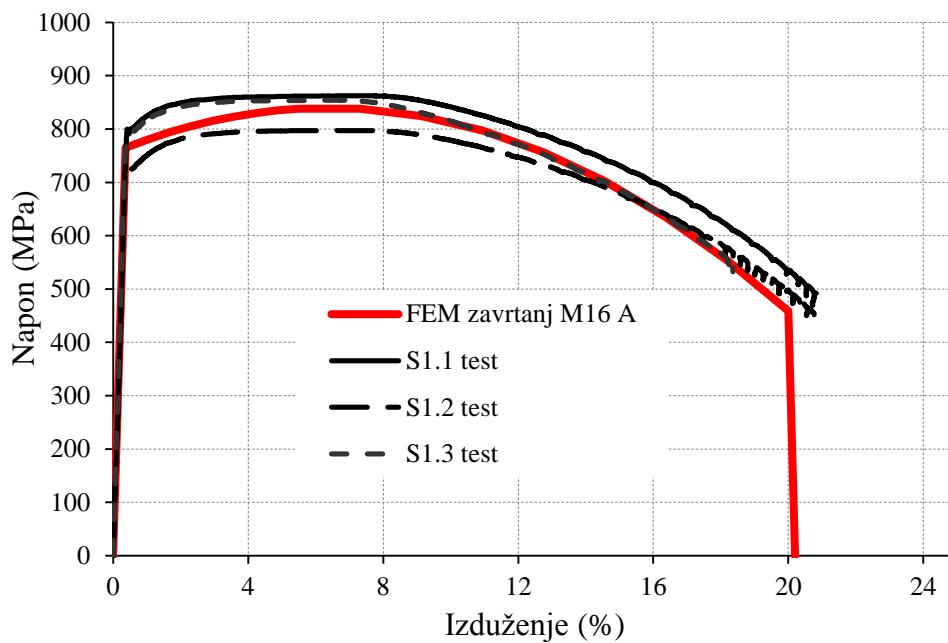
U FE modelu se preko ovog parametra vrši redukcija inicijalne vrednosti modula elastičnosti  $E_D=(1-D)E$ , odnosno redukcija vrednosti napona, ili tenzora napona,  $\sigma = (1 - D)\bar{\sigma}$ , ( $\bar{\sigma}$  je napon ili tenzor napona koji bi odgovarao modelu bez oštećenja), čime se definiše silazna grana dijagrama. Određivanjem parametra oštećenja na osnovu ispitivanja epruveta i kalibracije odgovarajućih modela u ABAQUS-u se detaljno bavio [Pavlović, 2014], odakle su preuzete krive koje definišu kriterijum početka oštećenja ( $\theta$ ) u zavisnosti od plastične dilatacije u trenutku nastanka oštećenja. (slika 4.6).



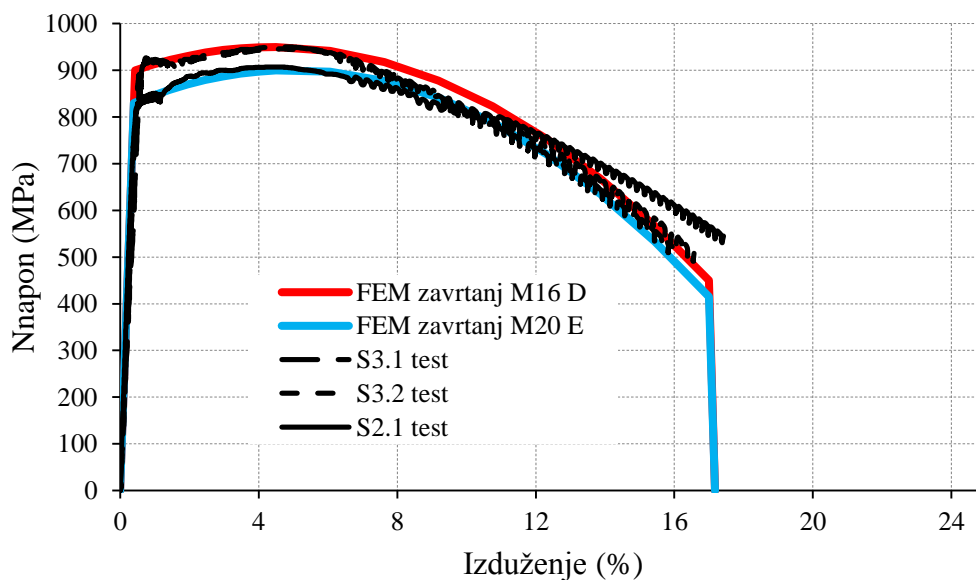
**Slika 4.6** Parametar prostornog stanja napona  $\theta$  kao kriterijum za nastanak oštećenja [Pavlović, 2014]

Zavisnost parametra oštećenja  $D$  od plastične dilatacije kalibrisana je prema dijagramima napon - izduženje koji su dobijeni eksperimentalnim ispitivanjem probnih tela materijala ugrađenih u uzorke (detaljnije je dato u poglavlju 3).

Na slikama 4.7 i 4.8 prikazani su modeli materijala za zavrtnjeve, preklopljeni sa merenim vrednostima na provnim telima u obliku epruveta koje su izrađene od zavrtnjeva ugrađenih u uzorke u okviru eksperimentalnog dela ovog istraživanja.



**Slika 4.7** Model materijala za zavrtnjeve M16 serije A, B i C



**Slika 4.8** Model materijala za zavrtnjeve M16 i M20 serije D i E

Zavrtnjevi su napregnuti dominantno na smicanje pa je, pri formiranju FE modela u ABAQUS-u bilo neophodno definisati i model progresivnog oštećenja materijala pri smicanju. Kao kriterijum za početak opštećenja u ovom slučaju se definiše parametar stanja napona pri smicanju ("shear stress ratio")  $\theta_s$ , definisan kao:

$$\theta_s = \frac{q + k_s \cdot p}{\tau_{max}} \quad (4.3)$$

gde je:

$k_s$  – koeficijent materijala, usvojena vrednost  $k_s = 0.2$  [ABAQUS, 2012]

$\tau_{max}$  – vrednost maksimalnog napona smicanja,

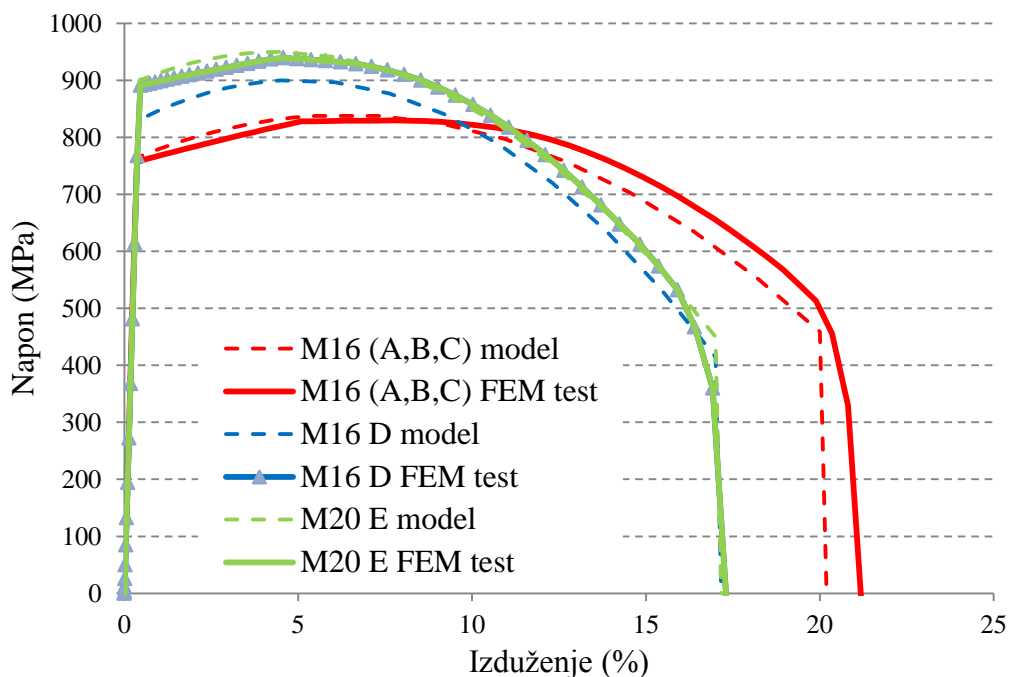
$q, p$  – vrednosti napona definisane izrazima (4.1) i (4.2).

Određevanjem parametara za modele oštećenja materijala pri modeliranju u ABAQUS-u se bavio [Pavlović, 2014], kalibracijom ovih vrednosti, koja je izvršena upoređivanjem eksperimentalnog ispitivanja zavrtnja na čisto smicanje i odgovarajućeg modela u konačnim elementima u ABAQUS-u. Rezultat ovih modeliranja je, između ostalog, da vrednost parametra stanja napona pri smicanju ne odstupa značajno od vrednosti koja odgovara pri čistom smicanju  $\theta_s = \sqrt{3} = 1.732$ .

U skladu sa tim je, za kriterijum početka nastanka oštećenja, usvojeno dostizanje ekvivalentne plastične dilatacije. Vredost ovog parametra je kalibrisana prilikom formiranja numeričkog modela, i usvojena je vrednost od 0.05. Pored kriterijuma za početak oštećenja pri smicanju, neophodno je definisati i zakon razvoja oštećenja od ekvivalentne plastične dilatacije koja odgovara početku oštećenja, do plastičnog pomeranja koje odgovara lomu. Kalibracijom je plastično pomeranje, koje odgovara lomu, postavljeno na vrednost od 0.2 mm, a odabran je zakon prirasta sa eksponencijalnim funkcijom, a eksponent je kalibracijom utvrđen na vrednost od 0.7.

Sa ovako definisanim parametrima, i definisanim odgovarajućim krivama napon dilatacija na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja epruveta, formirani su ulazni podaci za materijale za proračun u ABAQUS-u. U cilju kontrole i testiranja materijala, napravljen je model ispitivanih epruveta u konačnim elementima (FEM test), i dobijena su odlična slaganja ponašanja modeliranih epruveta sa sa ulaznim dijagramom napon – izduženje, koji je usvojen kao ulazni podatak o materijalu. Rezultati FEM testa su prikazani punim linijama na slici 4.9, a isprekidnim linijama su prikazane ulazne krive za model materijala zavrtnja M16 iz uzorke serija A, B i C (korišćen kao ulazni podatak

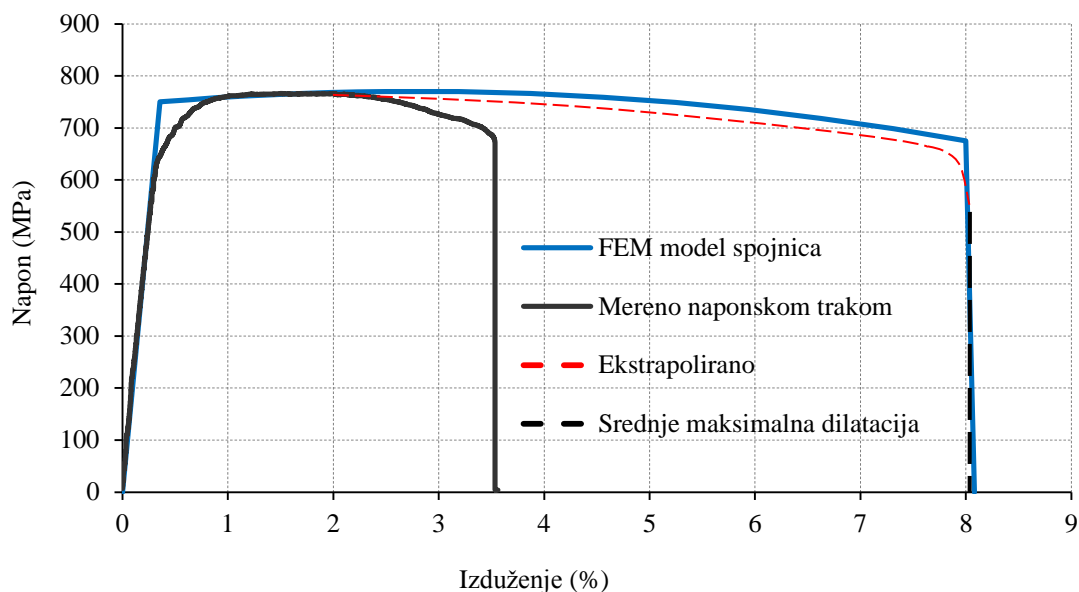
u FEM\_A i FEM\_C) , zatim zavrtanj M16 iz serije D (korišćen kao ulazni podatak u FEM\_D) i zavrtanj M20 iz serije E (korišćen kao ulazni podatak u FEM\_E).



**Slika 4.9** Testiranje modela materijala za zavrtnjeve sa usvojenim parametrima

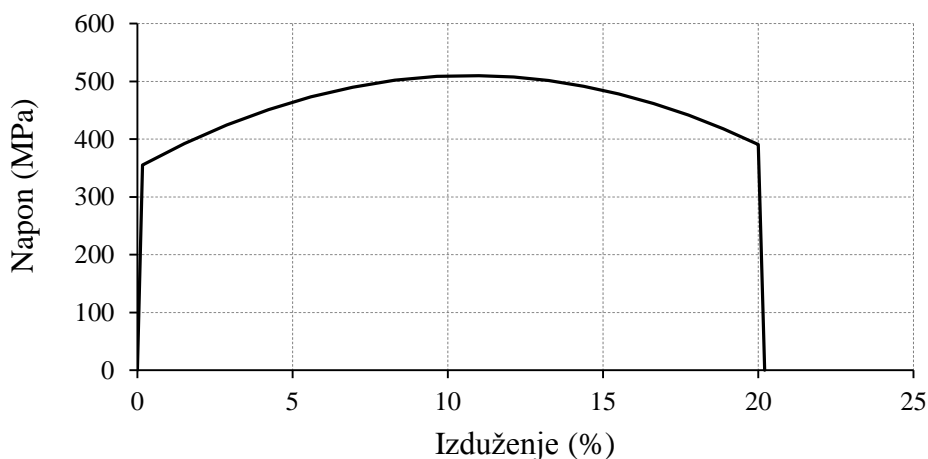
Mehaničke karakteristike čelika za mehaničke spojnice su definisane preko sintetičkog dijagrama prava –parabola – prava koji daje zavisnost napona i izduženja. Kao što je objašnjeno u poglavlju 3, s obzirom na geometriju i dimenzije mehaničkih spojnica, nije bilo moguće napraviti epruvete za eksperimentalno ispitivanje materijala sa bazom dovoljne dužine za primenu raspoloživih ekstenziometara, ali je pokazano da su podaci o granici tečenja, čvrstoći materijala i maksimalnoj dilataciji za pojedine šarže, koje je dostavio proizvođač, (tabela 3.6) pouzdani. Ulazni dijagram nominalnog napona i dilatacija za modele u Abaqusu formiran je, dakle, preko parametara koji čine granica razvlačenja  $R_{p02}=750$  MPa, čvrstoća pri zatezanju  $R_m=770$  MPa i maksimalna dilatacija  $\varepsilon_{uz}=8\%$ . Model ponašanja materijala je na slici 4.10 upoređen sa krivom dobijenom merenjem na epruveti sa mernom trakom, a zatim ekstrapoliracijom do srednje maksimalne dilatacije prema specifikaciji materijala koju je dostavio proizvođač.

Za spojnice je, u skladu sa načinom naprezanja, usvojen i, kao ulazni set podataka, unet u ABAQUS samo model duktilnog oštećenja, sa kriterijumom nastanka oštećenja preko parametra  $\theta$  (slika 4.6), i parametra oštećenja  $D$  na osnovu kalibracije modela. Model oštećenja pri smicanju nije razmatran za ovaj materijal.



**Slika 4.10** Mehanička spojnica – usvojeni model materijala

Za preostale elemente od čelika – flanšu čeličnog profila, armaturni anker i armaturu se ne očekuju dostizanja naprezanja koja bi izazvala oštećenja, a pogotovu ne lom materijala. Kod flanše se može očekivati da po omotaču rupe dođe do utiskivanja navoja zavrtnja, kao i da, pri zakretanju smičućeg konektora pred lom, dođe do utiskivanja spojnice u površinu flanše iznad rupe kroz koju prolazi zavrtnj. Materijal flanše je modeliran krivom na slici 4.11.

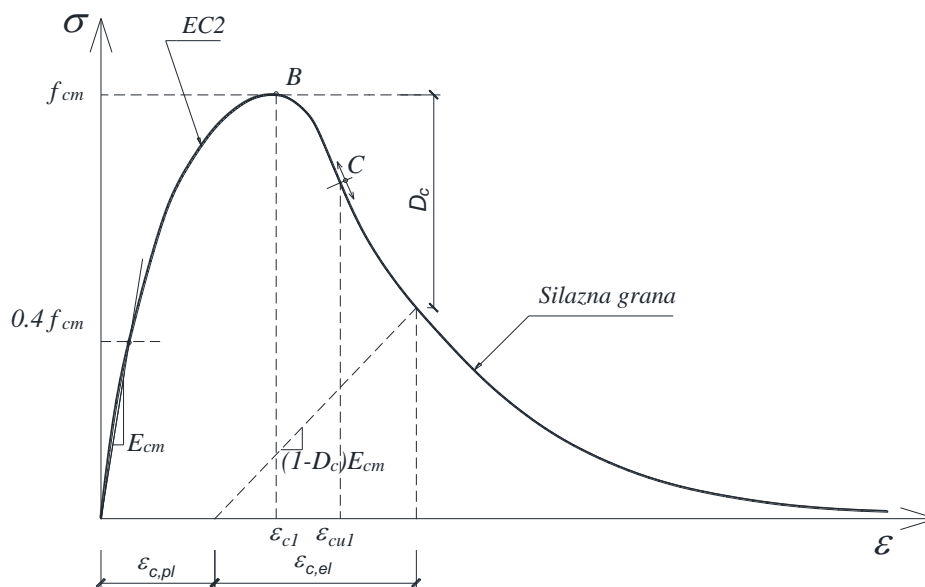


**Slika 4.11** Flanša čeličnog profila – usvojeni model materijala

Parametari krive su granica razvlačenja  $R_{p02}=355$  MPa, čvrstoća pri zatezanju  $R_m=510$  MPa i maksimalna dilatacija  $\epsilon_m=20\%$ . Model razvoja oštećenja nije definisan. Armatura je modelinarna bilineranim dijagramom sa parametrima  $R_{p02}=400$  MPa i  $R_m=500$  MPa.

#### 4.4.2 Beton

Modeliranje mehaničkih karakteristika betona u ABAQUS-u je moguće izvršiti preko modela koji istovremeno uzima u obzir plastično ponašanje i oštećenje ("Concrete Damage Plasticity" - CDP). Tom prilikom je moguće definisati posebno model za pritisak, a posebno za zatezanje.



**Slika 4.12** Opšti oblik dijagrama napon dilatacija za pritisnuti beton, uzimajući u obzir i oštećenje

Za modeliranje materijala sa oštećenjem od posebnog značaja je silazni deo dijagrama na slici 4.12. Konvencionalni dijagram koji propisuje [EC2, 2004] se odnosi na deo dijagrama od koordinatnog početka do tačke C, koja odgovara graničnoj dilataciji pritiska u betonu  $\epsilon_{cul}$ . Ovaj deo dijagrama je definisan izrazom:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (4.4)$$

gde je:

$$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1},$$

$\epsilon_{c1}$  dilatacija koja odgovara maksimalnom naponu (tačka B, slika 4.12)

$$k = 1.05 E_{cm} (\epsilon_{c1} / f_{cm})$$

Oblik silazne grane dijagrama napon dilatacija za pritisnuti beton značajno utiče na ponašanje FE modela u fazi nastanka oštećenja u betonu. Oblik ovog dela definiše parametar oštećenja betona pri pritisku  $D_c$ . Retki su primeri definisanja oblika silazne grane dijagrama napon dilatacija za beton pri pritisku u literaturi. Ovim su se



problemom bavili [Xu et al, 2012] za potrebe numeričkog modeliranja ponašanja grupe moždanika u betonu, a što se tehničke regulative tiče, samo kineski propisi [GB50010, 2002] daju analitički izraz za silazni deo dijagrama. Ispitivanjem uticaja parametara koji definišu silazni deo dijagrama napon - dilatacija betona pri pritisku na modeliranje ovog materijala u fazi velikih oštećenja, detaljno se bavio [Pavlović, 2014], i dao predlog veze napona i dilatacije u sinusoidnom obliku (deo D-E, slika 4.13), sa linearnim produženjem (deo E-F, slika 4.13):

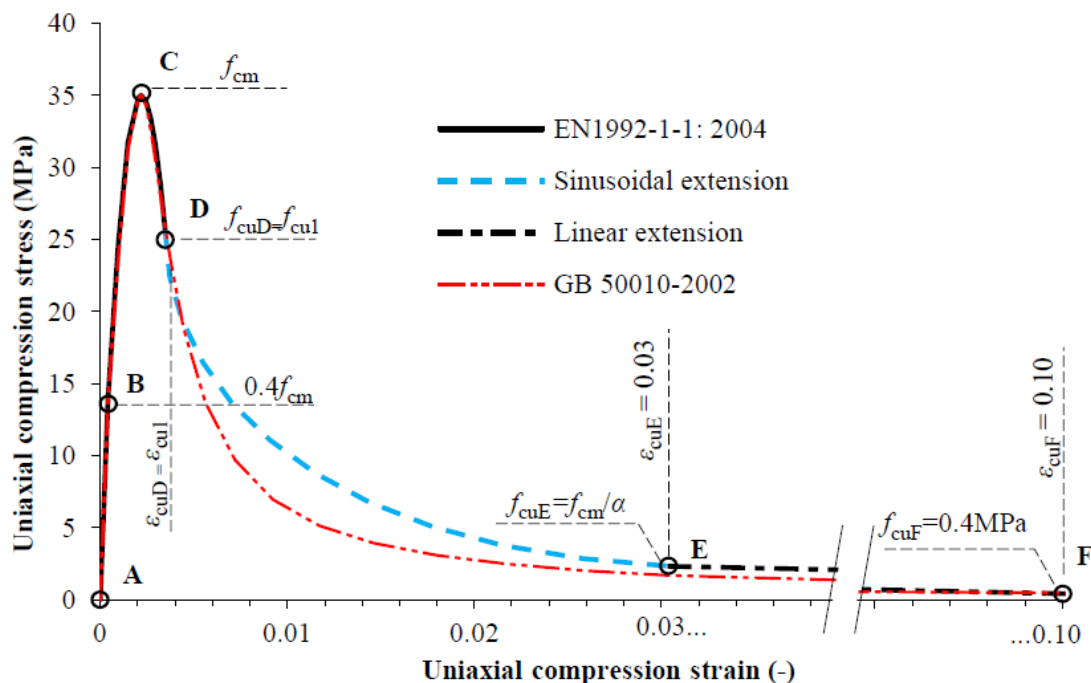
$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cm} \left[ \frac{1}{\beta} - \frac{\sin(\mu^\alpha \cdot \alpha_{tE} \pi / 2)}{\beta \cdot \sin(\alpha_{tE} \pi / 2)} + \frac{\mu}{\alpha} \right], & \varepsilon_{cuD} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cuE} \\ \frac{f_{cuE}(\varepsilon_{cuF} - \varepsilon_c) + f_{cuF}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cuE})}{(\varepsilon_{cuF} - \varepsilon_{cuE})}, & \varepsilon_c > \varepsilon_{cuE} \end{cases} \quad (4.5)$$

gde je:

$$\mu = (\varepsilon_c - \varepsilon_{cuD}) / (\varepsilon_{cuE} - \varepsilon_{cuD})$$

$$\alpha = f_{cm} / f_{cuE}$$

$$\beta = f_{cm} / f_{cu1}$$



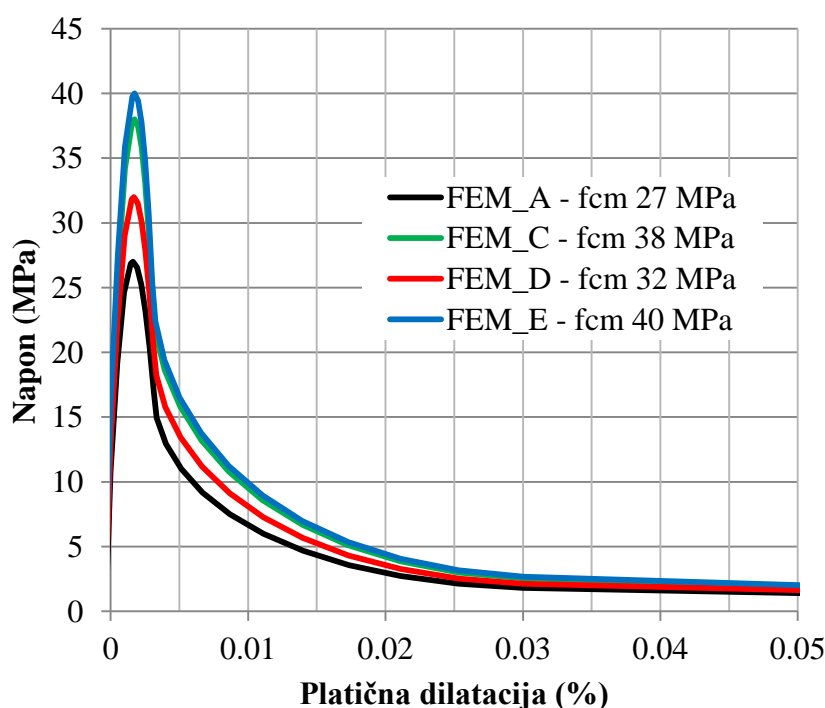
**Slika 4.13** Oblik dijagrama napon dilatacija za pritisnuti beton [Pavlović, 2014]

Dijagram napon dilatacija prikazan izrazom (4.5) primenjen je za definisanje svih FE modela u okviru ovog rada. Vrednosti parametara krive napon dilatacija koje su dobijene kalibracijom prema eksperimentalnim ispitivanjima. Usvojeno je da je

maksimalna dilatacija  $\varepsilon_{cuF}=0.10$ , a odgovarajući preostali napon  $f_{cuF}=0.4$  MPa. Faktor redukcije napona na kraju sinusoidalnog dela krive  $\alpha=15$  i odgovarajuća dilatacija  $\varepsilon_{cuE}=0.03$  su kalibrisani. Faktori koji određuju nagib tangenti na početku i kraju sinusoidalnog dela usvojeni su kao  $\alpha_{tD}=0.5$  and  $\alpha_{tE}=0.9$ . Na osnovu navedenih vrednosti, konstruisani su dijagrami napon dilatacija (slika 4.14), kao i funkcija parametra oštećenja  $D_c$  (slika 4.15), i uneti u FE model. Prikazani su samo nelinearni delovi dijagrama (od tačke B do F, prema slici 4.13). Linearni elastični deo (A - B) definisan je modulom elastičnosti. U tabeli 4.1 prikazane su usvojene vrednosti za čvrstoće i module elastičnosti i upoređene sa merenim (poglavlje 3). Za sve FE modele je usvojen Poasonov kefcijent  $\nu=0.2$ .

**Tabela 4.1** Karakteristike materijala usvojene za FE modele

| Na osnovu merenja |          |           |          | Usvojeno |          |           |          |
|-------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| Uzorak            | $f_{cm}$ | $f_{ctm}$ | $E_{cm}$ | FE model | $f_{cm}$ | $f_{ctm}$ | $E_{cm}$ |
|                   | MPa      | MPa       | MPa      |          | MPa      | MPa       | MPa      |
| A                 | 26.60    | 2.11      | 29504    | FEM_A    | 27       | 2.1       | 29500    |
| C                 | 37.72    | 2.63      | 31877    | FEM_C    | 38       | 2.6       | 32700    |
| D                 | 32.58    | 2.22      | 30139    | FEM_D    | 32       | 2.2       | 31300    |
| E                 | 39.41    | 2.52      | 31563    | FEM_E    | 40       | 2.5       | 33200    |

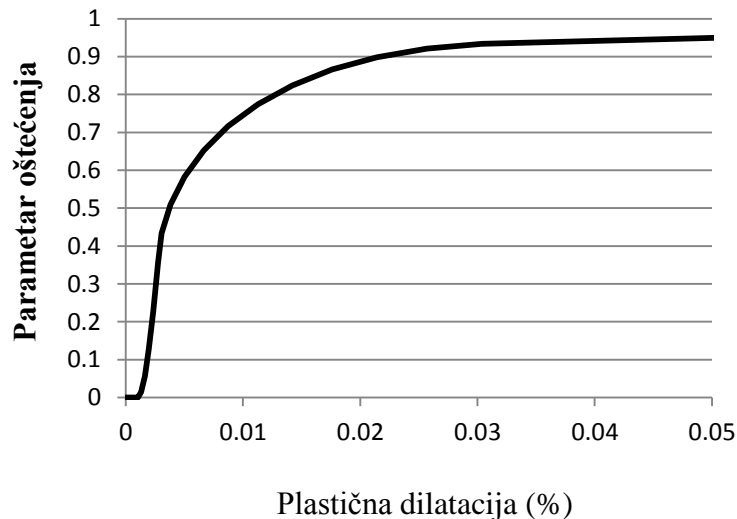


**Slika 4.14** Konstruisani dijagrami napon dilatacija za modeliranje betona pri pritisku

S obzirom da bezdimenzionalni parametar oštećenja betona pri pritisku  $D_c$  zavisi od oblika krive napon - dilatacija, za sve FE modele je, kao ulazni podatak za proračun u ABAQUS-u, usvojena kriva prikazana na slici 4.15. Ovaj parametar je definisan na slici 4.12, odnosno izrazom:

$$D_c = 1 - \frac{f_{cm}}{\sigma_c} \quad (4.6)$$

gde je napon  $\sigma_c$  definisan izrazom (4.5)



**Slika 4.15** Parametar oštećenja  $D_c$  za beton pri pritisku

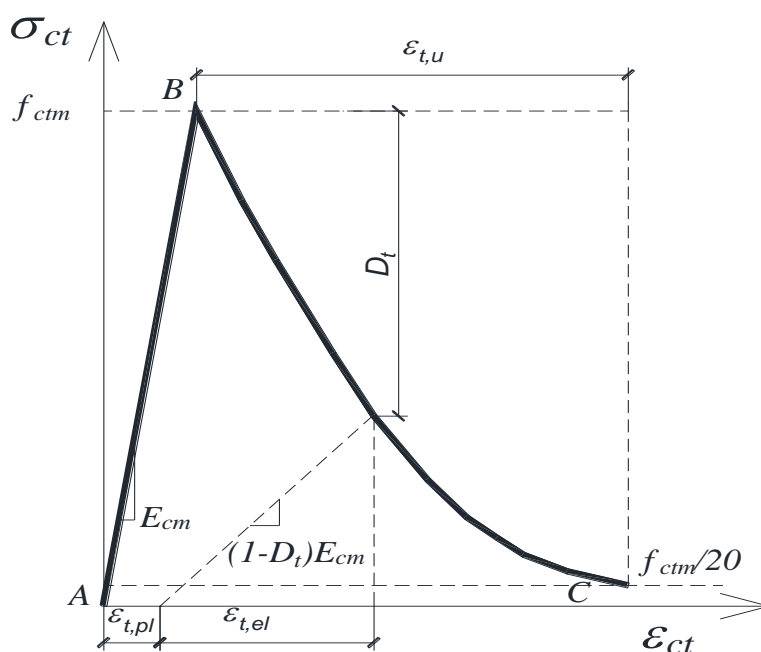
Pored prikazanih dijagrama, s obzirom na prostorno stanja napona pritiska u betonu u okolini konektora, za potrebe CDP modela materijala u ABAQUS-u, neophodno je definisati i sledeće parametre: ugao dilatacije  $\psi$ , ekscentricitet  $e$  i koeficijente  $f$  i  $K$ .

Ugao dilatacije  $\psi$  utiče na vrednost plastične dilatacije usled napona smicanja pri dilatacijama koje su iznad granice plastičnosti, i definiše se kao ugao dilatacije u  $p$ - $q$  ravni pri visokim pritiscima kod prostornog stanja napona. Vrednost ovog ugla, kao ulazni parametar za FE modeliranje, razmatrali su [Xu et al., 2012] i [Jankowiak and Lodigowski, 2005] i predložili vrednost od  $\psi=38^\circ$ . [Pavlović, 2014] je dobio najbolje slaganje rezultata za vrednost  $\psi=36^\circ$ , a [Spremić, 2013] je u svom istraživanju potvrdio da ovu vrednost treba odabrati u intervalu 36 do  $38^\circ$ . U ovom radu je, nakon kalibracije, usvojena vrednost  $\psi=36^\circ$ .

Za ekscentricitet  $e$ , parameter koji definiše brzinu kojom se površ tečenja približava asimptoti, usvojena je vrednost 0.1, preporučena u [ABAQUS, 2012].

Koeficijent  $f$  predstavlja odnos čvrstoće betona pri dvoaksijalnom i jednoaksijalnom pritisku, i usvojena je vrednost 1.2 prema [CEB-FIP Model code, 1990]. Koeficijent  $K$  definiše oblik granične površi plastičnih dilatacija u devijatorskoj ravni. Ovaj parametar se kreće u granicama od 0.5 i 1.0, a preporučena vrednost u [ABAQUS, 2012] je  $2/3$ . Vrednost  $K$  značajno utiče na rezultati proračuna. Nakon detaljnih analiza i kalibracije modela, [Spremić, 2013] je usvojio  $K=0.68$ , pri modeliranju veze sa moždanicima u grupi, a [Pavlović, 2014] vrednost  $K=0.59$ , za modeliranje veze sa ubetoniranim zavrtnjima. Nakon kalibracije modela smičuće veze preko konektora sa mehaničkom spojnicom u okviru ovog rada, usvojena je vrednost  $K=0.59$ .

Oblik krive napon – dilatacija za beton pri zatezanju prikazan je na slici 4.16. Usvojeno je da napon linearno raste do dostizanja čvrstoće betona pri zatezanju  $f_{cm}$ . Silazni deo dijagrama, usled omekšanja nastalog početkom razvoja prsline, se spušta do tačke C, kojoj odgovara maksimalna dilatacija, kojom se definiše pojava prsline, odnosno diskontinuiteta u modelu, za koju je usvojena vrednost  $\varepsilon_{t,u}=0.001$ . U ovoj tački je usvojena minimalna vrednost napona od  $f_{t,u}=f_{cm}/20$ , različita od nule zbog stabilnosti numeričkog proračuna.



**Slika 4.16** Opšti oblik dijagrama napon dilatacija za zategnuti beton

Silazna grana dijagrama je definisana izrazom koji je predložio [Pavlović, 2014]:

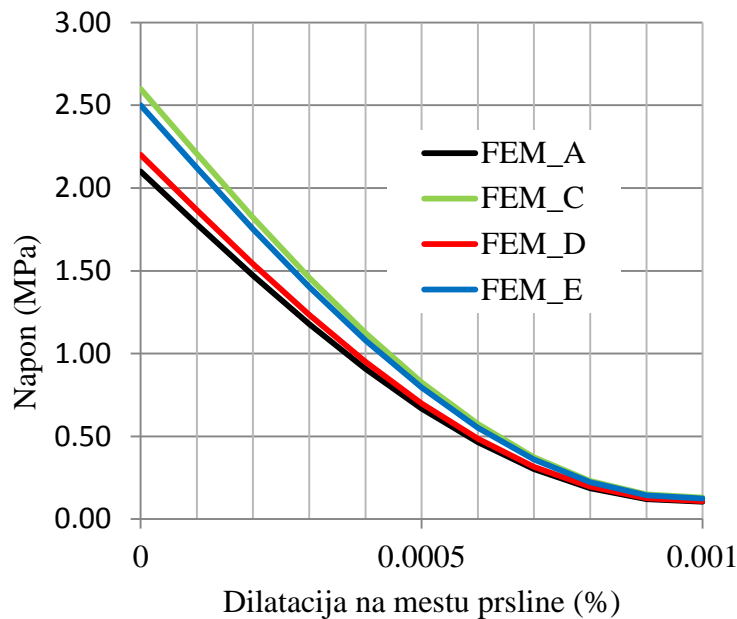
$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \left( 1 - \sin \left( \left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t,u}} \right)^{\alpha_{Mt}} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right) + f_{t,u} \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t,u}} \quad (4.7)$$

gde je  $\alpha_{Mt}=1$  usvojena vrednost parametra koji određuje nagib tangente u tački B na slici 4.15. Zakon promene parametra oštećenja betona pri zatezanju, slično kao i pri pritisku se definiše izrazom:

$$D_t = 1 - \frac{f_{ctm}}{\sigma_{ct}} \quad (4.8)$$

gde je  $\sigma_{ct}$  definisan izrazom (4.7).

Usvojene krive za različite FE modele prikazane su na slici 4.17. Ovde je prikazan samo silazni deo (od tačke B do C, prema dijagramu na slici 4.16).



**Slika 4.17** Konstruisani dijagrami napon dilatacija za modeliranje zategnutog betona različitih serija uzoraka

#### 4.5 Postupak nanošenja opterećenja u numeričkom modelu

Nanošenje opterećenja u FE modelima je podeljeno u dva dela. Prvi deo je ciklično opterećenje, a drugi opterećenje do loma. Ciklično opterećenje predstavlja ciklus opterećenja i rasterećenja od nule do 30 kN za modele FEM\_A, FEM\_C i FEM\_D, odnosno 50 kN za FEM\_E, što odgovara četvrtini sile do koje je vršeno treniranje odgovarajućih uzoraka pri eksperimentalnom ispitivanju (dijagram na slici 3.22). U drugoj fazi, opterećenje je zadato preko funkcije pomeranja U2 u vremenu, u

tački nanošenja opterećenja (slika 4.2). Funkcija zadatog pomeranja je zaobljena na početku i kraju, kako bi se izbegli skokovi u brzini nanošenja pomeranja.

#### **4.6 Način numeričkog proračuna**

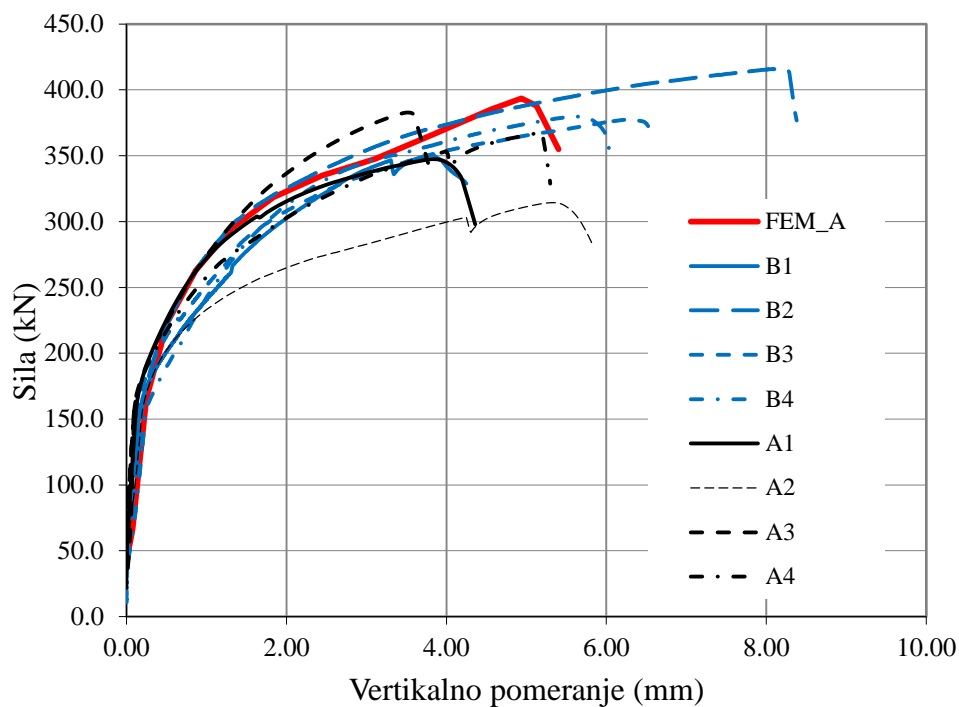
Proračun je sproveden u ABAQUS-u, uz korišćenje eksplicitnog modela za dinamičku analizu ("dynamic explicit solver") [ABAQUS, 2012]. Pošto bi proračun u realnom vremenu bio predug, neophodno je skraćivanje vremenskih inkremenata u kojima se sprovodi inkrementalno iterativni proračun. [Pavlović et al., 2014] su pokazali da opcija skaliranja masa ("mass scaling") daje neuporedivo bolje rezultate nego opcija skaliranja vremena ("time scaling"). Obe opcije su ugrađene u solver ABAQUS-a, ali se pokazuje da skaliranje vremena u cilju skraćivanja proračuna može dovesti do generisanja inercijalnih sila koje u potpunosti kompromituju rezultate. Primenom opcije skaliranja masa se, za željeni inkrement vremena, skaliraju mase pojedinih konačnih elemenata i time održava stabilnost numeričkog procesa. Tom prilikom, u okviru proračuna, skaliranje se vrši za svaki sledeći inkrement vremena, i različito za svaki konačni element mreže, u funkciji njegove veličine i vrste materijala. Za FE analizu u ovom radu se pokazalo da je inkrement vremena od 0.005 sekundi optimalan.

#### **4.7 Analiza rezultata numeričkog proračuna**

Nakon nanošenja opterećenja na sva četiri FE modela, koji odgovaraju serijama eksperimentalno ispitivanih uzoraka, dostignuto je granično stanje nastalo lomom zavrtnjeva na smicanje, uz pojavu oštećenja betona u okolini smičućeg konektora. Rezultati proračuna FE analizom biće prikazani u narednim delovima ovog poglavlja i upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima preko krive sila – pomeranje, kao i preko slike naponskih stanja i pojave prslina u betonu i ukupnih oštećenja koja nastaju tokom nanošenja opterećenja i dostizanja loma.

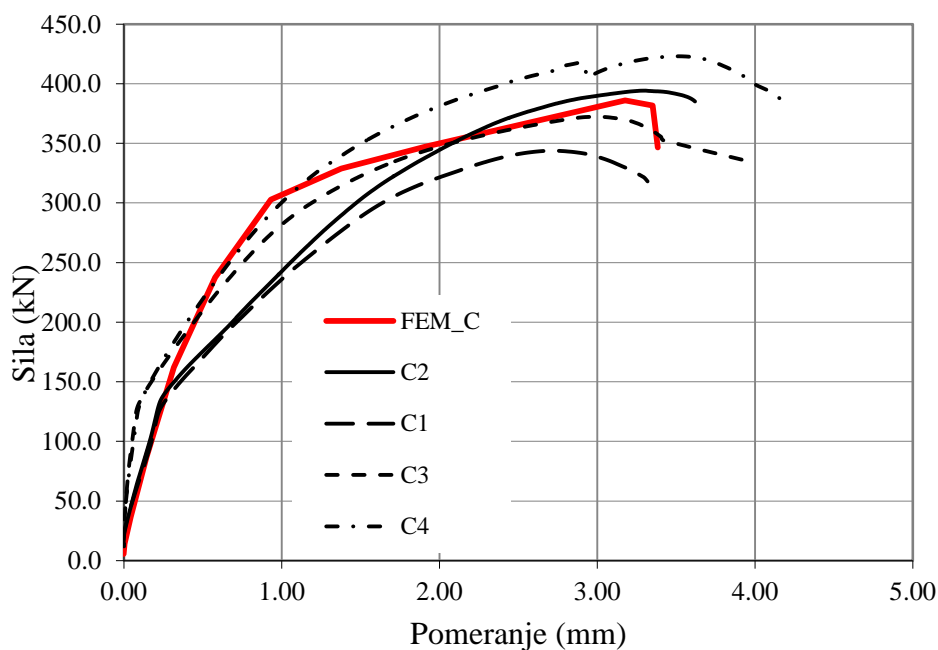
##### **4.7.1 Analiza funkcije opterećenja i vertikalnog pomeranja**

Rezultat proračuna na FE modelim je, između ostalog, zavisnost vertikalnog pomeranja ankera u funkciji nanetog opterećenja, u obliku zapisa numerički proračunatih pomeranja na mestima u modelu koja odgovaraju mestima na uzorku na kojima su vršena merenja pri eksperimentalnim ispitivanjima (merna mesta 1 do 4, prema slici 3.24).

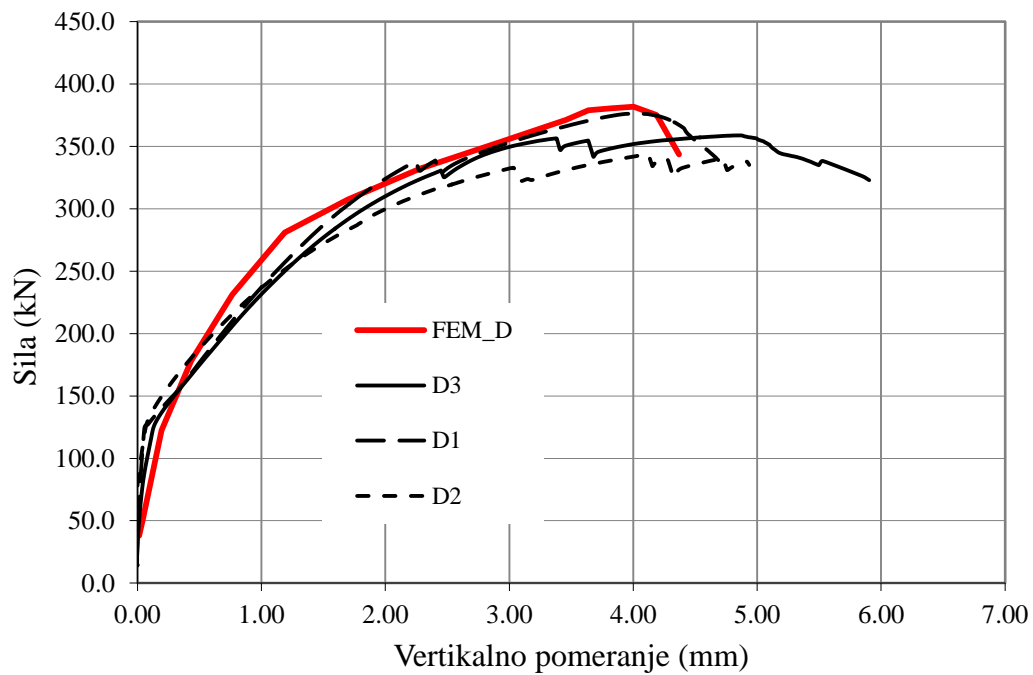


**Slika 4.18** Eksperimentalne krive i kriva dobijena FE proračunom za serije A i B

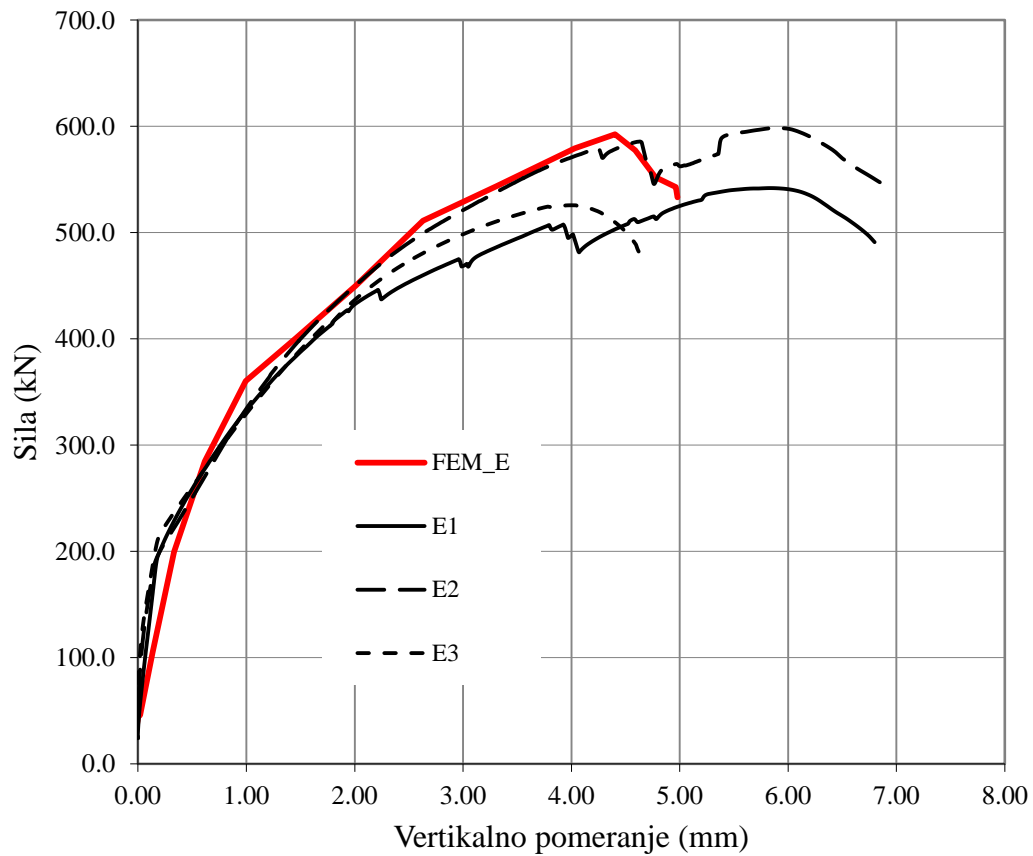
Krive opterećenje – vertikalno pomeranje koje predstavljaju rezultat proračuna su prikazane zajedno sa odgovarajućim krivama dobijenim merenjem tokom eksperimentalnih ispitivanja uzoraka. Na slici 4.18 prikazan je rezultat dobijen proračunom na modelu FEM\_A, i vrednosti dobijene eksperimentalno na uzorcima serija A i B, a slikama 4.19 do 4.21 odgovarajuće krive za serije C, D i E respektivno.



**Slika 4.19** Eksperimentalne krive i kriva dobijena FE proračunom za seriju C



**Slika 4.20** Eksperimentalne krive i kriva dobijena FE proračunom za seriju D



**Slika 4.21** Eksperimentalne krive i kriva dobijena FE proračunom za seriju E



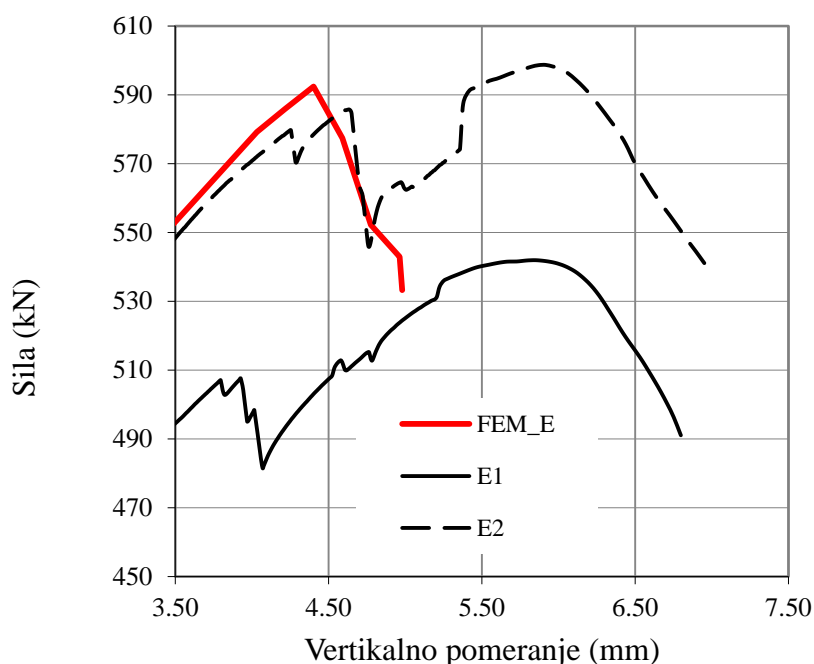
Prikazane krive predstavljaju rezultat proračuna na FE modelima sa jedinstvenim parametrima za proračun svih modela u ABAQUS-u, jer su za sve modele korišćeni isti parametri kao što su, između ostalog, oblik funkcija napon – dilatacija, parametri oštećena i prostornog stanja napona, u skladu sa vrednostima definisanim u paragrafima 1.4.1 i 1.4.2 ovog poglavlja. Razlikuju se samo mehaničke karakteristike različitih materijala, koje su zadate u skladu sa eksperimentom dobijenim vrednostima. Kalibracija jedinstvenih parametara za sve modele predstavljala je složen i dugotrajan posao s obzirom na rasipanje rezultata eksperimentalnog istraživanja. Kao što je zaključeno u poglavlju 3, ovo rasipanje je najvećim delom posledica odstupanja dimenzija pri izradi pojedinih prefabrikovanih AB prizmi ispitivanih uzorke, kao i ravnosti površina i prisustva trenja između čelične flanše i betona prizmi, što je u skladu sa intencijom, da se, u okviru ove teze, razmatraju smičuće veze na uzorcima izrađenim u uslovima koji, koliko je to moguće, odgovaraju uslovima na gradilištu. U tabeli 4.2 upoređene su vrednosti dobijene merenjem tokom eksperimenta i proračunom na FE modelima. Upoređivane su maksimalne sile  $P_{ult}$  i maksimalna vertikalna pomeranja  $\delta_u$ . Pomeranje  $\delta_u$  definisano je na slici 3.27.

**Tabela 4.2** Poređenje rezultata FA proračuna i merenja

|         |                     | M16    |        |        | M20    |
|---------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
|         |                     | A+B    | C      | D      | E      |
| Merenje | $P_{ult}$ (kN)      | 363.77 | 383.34 | 359.64 | 555.45 |
|         | $\delta_u$ (mm)     | 5.69   | 3.81   | 5.22   | 6.28   |
| Model   |                     | FEM_A  | FEM_C  | FEM_D  | FEM_E  |
|         | $P_{ult}$ (kN)      | 393.60 | 385.90 | 381.70 | 592.40 |
|         | $\delta_u$ (mm)     | 4.94   | 3.18   | 4.36   | 4.99   |
| Razlika | $\Delta_P$ (%)      | 7.6    | 0.7    | 5.8    | 6.2    |
|         | $\Delta_\delta$ (%) | 15.2,  | 19.8   | 19.8   | 25.9   |

Dobijene razlike u veličini sila loma se kreću u intervalu od ispod 1% do 7.5%, što se može smatrati dobrim slaganjem rezultata, s obzirom na relativno veliko rasipanje rezultata eksperimentalnih merenja. Ovaj zaključak se naročito odnosi na serije A i B, kod kojih je rasipanje eksperimentalnih rezultata i najveće. Prilikom upoređenja rezultata (tabela 4.2), iz analize su isključeni rezultati za uzorak A2, s obzirom na veliko odstupanje merenih rezultata za ovaj uzorak od rezultata ostalih uzoraka serija A i B.

Razlika poređenih rezultata graničnih vertikalnih pomeranja  $\delta_u$  je veća, kreće se od 15 do 25%, što je posledica velikog rasipanja izmerenih vrednosti dobijenih pri eksperimentalnom ispitivanju uzoraka. Najveće odstupanje se javlja kod serije E. Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju (paragraf 3.5.6, slika 3.51), lom zida mehaničke spojnice pri silama bliskim graničnoj nosivosti smičućeg konektora, dovodi do skokovitog poremećaja u dijagramu sila – vertikalno pomeranje, i za rezultat ima povećanje maksimalnog pomeranja  $\delta_u$  i relativno neznatnog povećanja granične sile  $P_{ult}$ . Detalj ovog poremećaja na eksperimentalno dobijenim krivama za uzorke E1 i E2, na slici 4.22 je upoređen sa odgovarajućim krivom dobijenom proračunom na FE modelu. Pri numeričkom modeliranju, nije došlo do loma zida spojnice, iako su dostignute vrednosti glavnih napona u zidu spojnice na samoj granici čvrstoće materijala pri zatezanju. Naprezanje mehaničke spojnice detaljno je razmatrano u poglavlju 6.

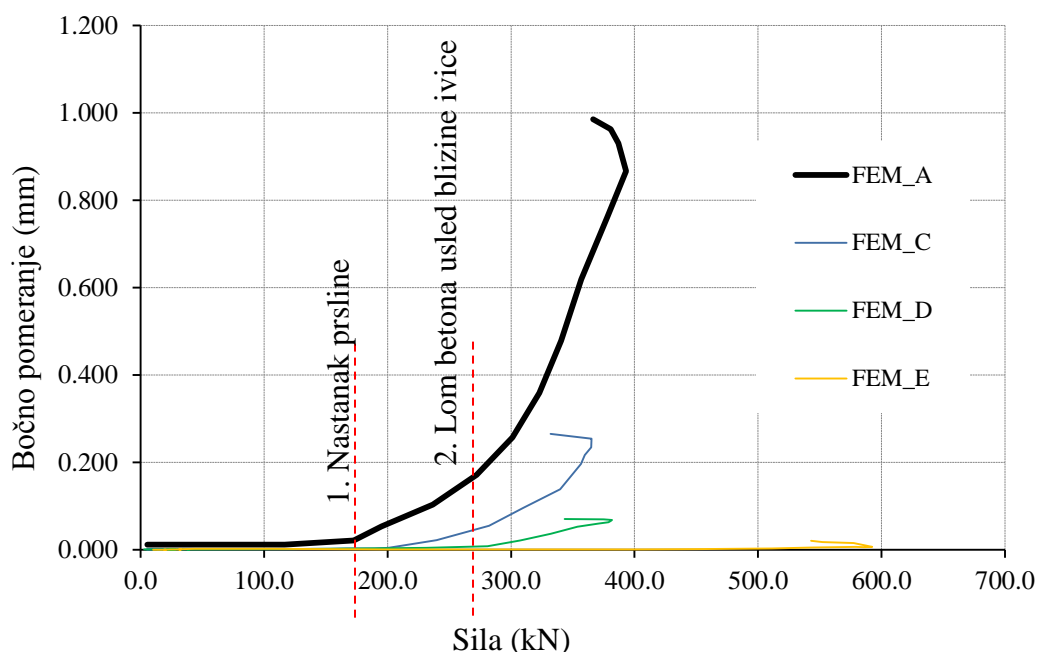


**Slika 4.22** Eksperimentalne i FEM kriva za seriju E – detalj

U poglavlju 3 je prikazan lom betona usled blizine ivice na uzorcima serija A i B (slike 3.21, 3.29, 3.34 i 3.35). Pri proračunu FEM\_A, koji odgovara uzorcima serije A i B, praćeno je i horizontalno bočno pomeranje između smičućeg konektora i ivice betona, kako bi se detektovala eventualna pojava prslina i oštećena u toj zoni. Dijagram zavisnosti sile i bočnog pomeranja prikazan je na slici 4.23. Pomeranja za FE modele FEM\_C, FEM\_D i FEM\_E nisu od značaja, jer na uzorcimima odgovarajućih serija nisu

uočene kose prsline ispred i iza smičućeg konektora prema ivici elementa. Proračunata pomeranja za ovu grupu FE modela su mala, i posledica su bočnog širenja betona.

Međutim, prikazana kriva bočnog pomeranja za FEM\_A, je značajna, jer beleži razmicanje ivice AB prizme i smičućeg konektora usled nastanka prsline, sve do loma betona usled blizine ivice. Trenutak nastanka prsline na slici 4.23, označen je linijom 1, a trenutak loma usled ivice betona, koji karakteriše otvaranje prsline pod uglom koja propagira od smičućeg konektora do ivice betonskog elementa, linijom 2.



**Slika 4.23** Bočno pomeranje ivice AB prizme u odnosu na osu smičućeg konektora

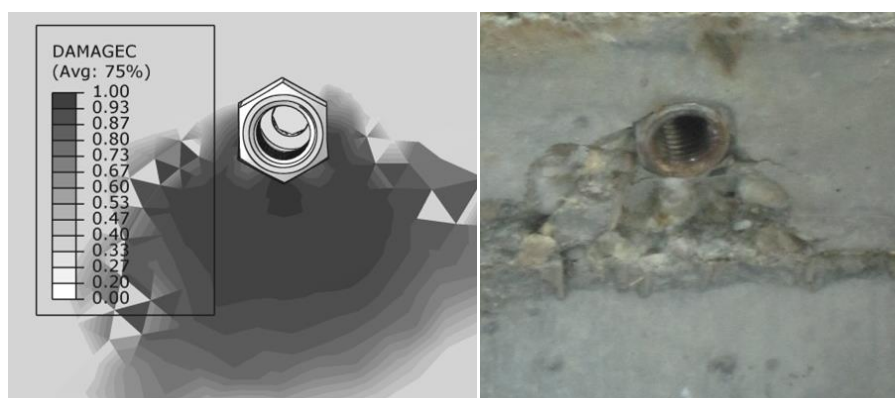
#### 4.7.2 FE modeliranje graničnog stanja nosivosti i oštećenja na modelu

Pri dostizanju graničnog stanja nosivosti tokom eksperimentalnih ispitivanja uzoraka do loma, na svim uzorcima su se, u manjoj ili većoj meri, pojavila oštećenja kao posledica povećanog lokalnog pritiska na beton ispod smičućeg konektora. Ova oštećenja, u vidu oljuskavanja (krunjenja) ili odvaljivanja dela zaštitnog sloja betona, posledica su dostizanja čvrstoće pri pritisku betona i pojave lokalnog loma. Na slikama 4.24 do 4.27 je prikazano poređenje oblika oštećenja na FE modelima, dobijene numeričkim proračunom u ABAQUS-u, sa odgovarajućim oštećenjima na uzorcima posle ispitivanja do loma. Kao rezultat FE proračuna je prikazan parametar oštećenja

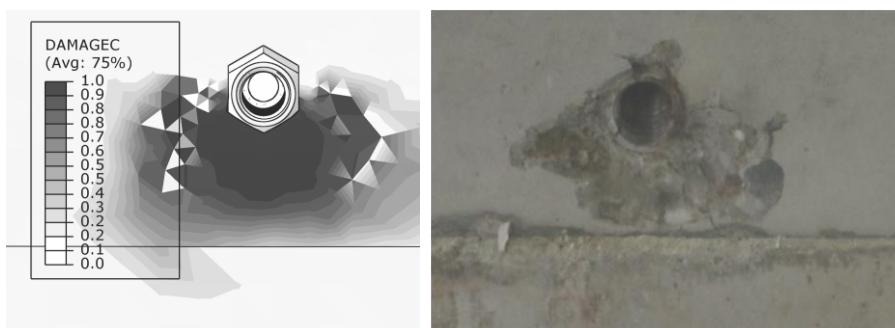
betona pri pritisku (DAMAGEC). Vrednost ove promenljive se kreće od 0 (material bez oštećenja) do 1 (potpuno oštećenje).



**Slika 4.24** Dijagram parametra oštećenja betona pri pritisku – FEM\_A (levo) i oštećenje nastalo na uzorku serije A (desno)



**Slika 4.25** Dijagram parametra oštećenja betona pri pritisku – FEM\_C (levo) i oštećenje nastalo na uzorku serije C (desno)

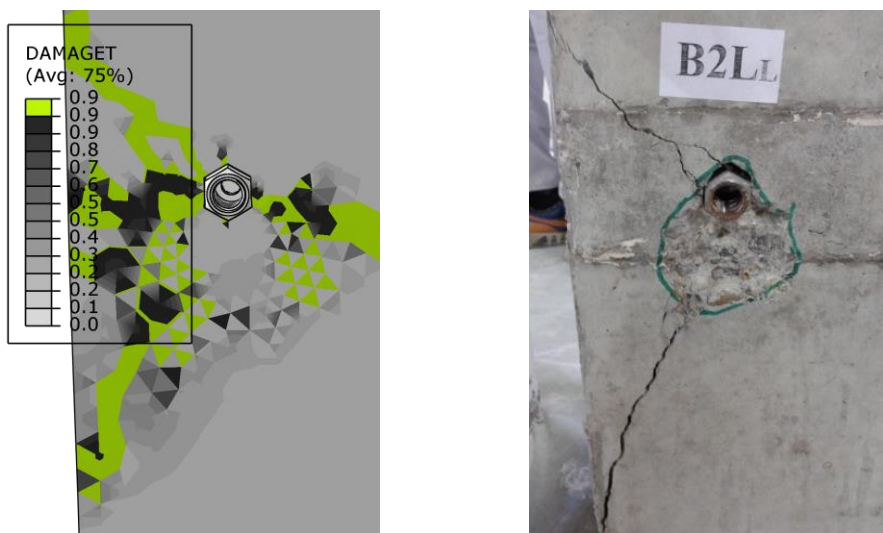


**Slika 4.26** Dijagram parametra oštećenja betona pri pritisku – FEM\_D (levo) i oštećenje nastalo na uzorku D (desno)



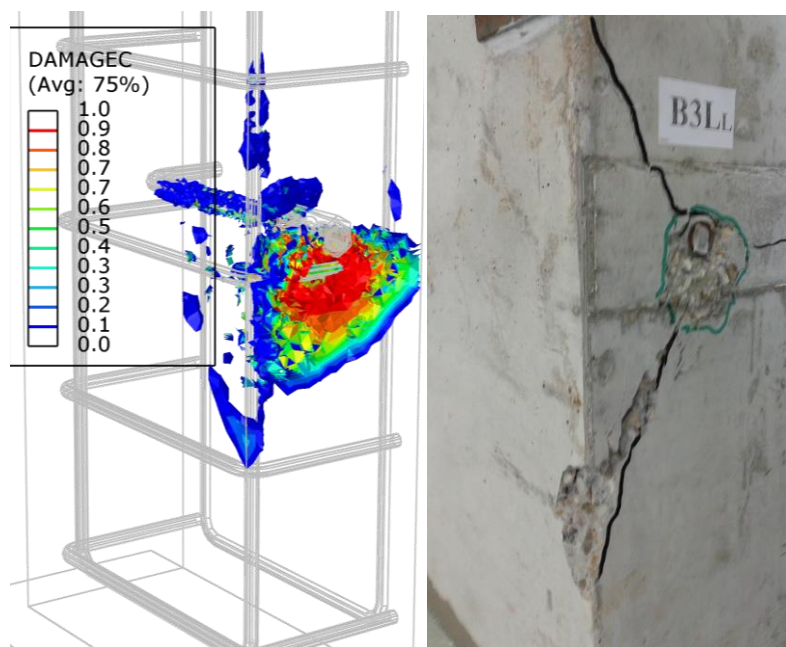
**Slika 4.27** Dijagram parametra oštećenja betona pri pritisku – FEM\_E (levo) i oštećenje nastalo na uzorku serije E (desno)

Kod uzoraka serije A i B je, kao što je prikazano u poglavlju 3, nakon ispitivanja je konstatovan lom usled blizine ivice betona, pre konačnog loma zavrtnja na smicanje. Na slici 4.28 je prikazano oštećenje betona pri zatezanju dobijeno numeričkim proračinom na modelu FEM\_A. Prikazane su vrednosti parametra oštećenja betona pri zatezanju (DAMAGET). Paralelno je prikazan uzorak serije B, kod koga je, tokom ispitivanja, dostignut lom usled blizine ivice betona.



**Slika 4.28** Dijagram parametra oštećenje betona pri zatezanju – FEM\_A (levo) i i oštećenje naastalo na uzorku serije B (desno)

Na slici 4.29 je prostorno prikazan razvoj oštećenja betona pri pritisku u blizini ivice betona, po "dubini" betonske prizme, dobijen numeričkim proračunom na FEM\_A. Rezultat numeričkog proračuna je upoređen sa uzorkom iz serije B posle ispitivanja



**Slika 4.29** Oštećenje betona pri pritisku u blizini ivice – FEM\_A i uzorak serije B

U prethodnom poglavlju, u paragrafu 3.5.1, opisana su oštećenja na uzorcima serije A i B, gde je, u toku ispitivanja, dostignut lom betona usled blizine ivice. Konstatovano je da se, tom prilikom, oštećenja javljaju u zaštitnom sloju armiranobetonske prizme, do uzengije. Na slici 4.29 se na levoj strani uočava da su oštećenja betona pri lokalnom pritisku, dobijena numeričkim proračunom, upravo zahvatila sloj betona do uzengije.

U prethodnim delovima ovog poglavlja su prikazani rezultati numeričkog proračuna na FE modelima programom ABAQUS, u preko dijagrama krivih sila – pomeranje, kao i oblika i stepena oštećenja betona pri pritisku i zatezanju. Ovaj proračun je sproveden nakon početne kalibracije odgovarajućih ulaznih veličina, i formiranja jedinstvenog numeričkog modela na bazi parametar za proračun koji, između ostalog, obuhvataju definisanje oblika i parametara dijagrama napon – dilatacija, zatim definisanje parametara graničnog stanja nosivosti pojedinih materijala pri prostornom naponskom stanju, kao i parametara oštećenja. Na bazi ovako definisanog modela materijala, numerički su modelirani uzorci koji odgovaraju svim ispitivanim serijama.

Rezultati numeričkog modeliranja na FE modelima u ABAQUS-u vrlo dobro se slažu sa rezultatima dobijenim eksperimentalnim ispitivanjem uzoraka svih serija do loma, pogotovo ako se u obzir uzme relativno veliko rasipanje eksperimentalnih rezultata, naročito kada su u pitanju granična vertikalna pomeranja pri lomu.

Na osnovu izvedenog zaključka sledi da je moguće, uz korišćenje razvijenog numeričkog modela, sa definisanim parametrima za proračun, kao i numeričkim modelima materijala, pristupiti daljoj numeričkoj parametarskoj analizi, formiranjem FE modela u ABAQUS-u u cilju utvrđivanja uticaja pojedinih veličina na nosivost i ponašanja smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom. Parametarskom analizom je naročito razmatran uticaj čvrstoće betona, prečnika zavrtnja i rastojanja konektora od ivice betona, a postupak i rezultati ove analize su prikazani u sledećem poglavlju.

## **5 Numerička parametarska analiza**

### **5.1 Uvod**

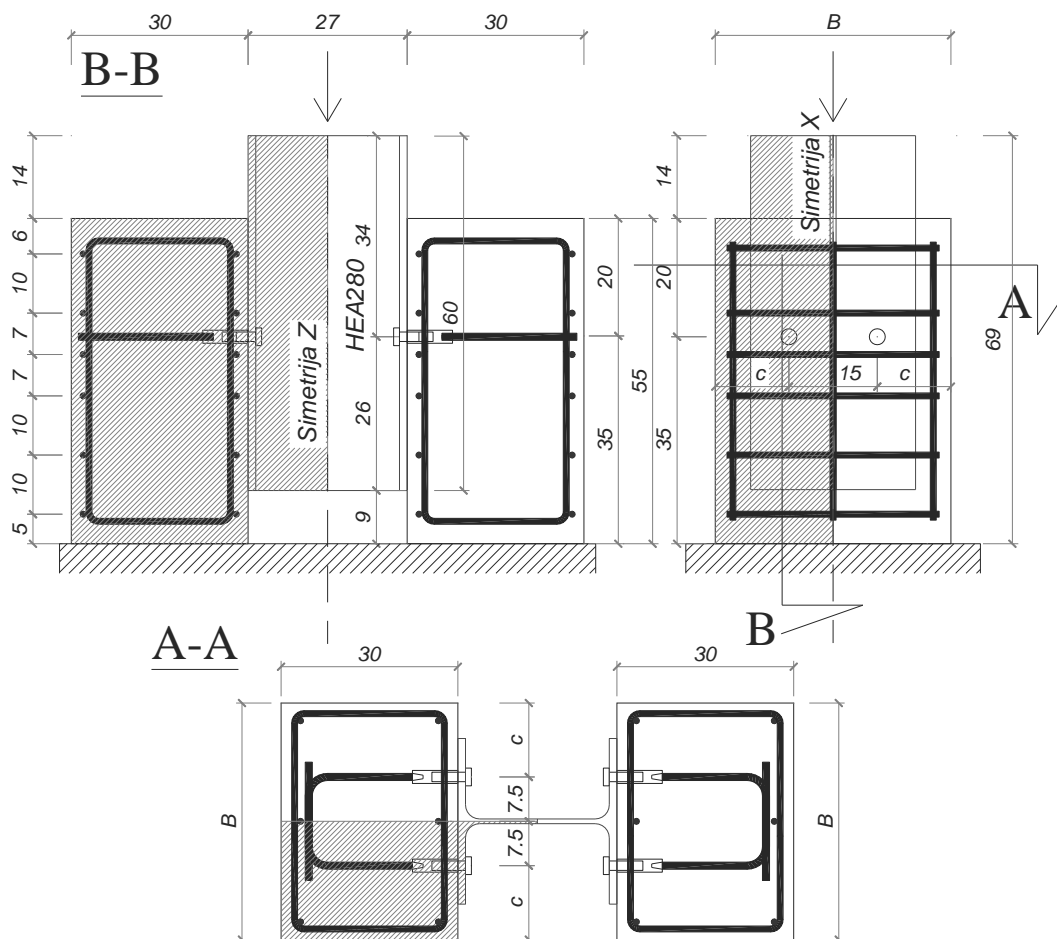
U prethodnom poglavlju su formirani numerički FE modeli u programu ABAQUS, koji po svojoj geometriji i dimenzijama, kao i mehaničkim karakteristikama materijala odgovaraju eksperimentalno ispitivanim uzorcima serija A do D (poglavlje 3.). Prilikom formiranja FE modela izvršena je njihova kalibracija prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja uzoraka. Tako su određeni ulazni parametri za numerički proračun na FE modelima, i, nakon proračuna, dobijeni su rezultati koji se vrlo dobro slažu sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, kao što je to pokazano u prethodnom poglavlju. Sledi zaključak da se ovako određeni ulazni parametri za numerički proračun mogu upotrebiti za dalju detaljniju analizu ponašanja i nosivosti smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom.

Analizom rezultata eksperimentalnog ispitivanja uzoraka i numeričke analize odgovarajućih FE modela u prethodnim poglavljima se može zaključiti da na način loma, graničnu nosivost i maksimalna pomeranja modela sa smičućom vezom ostvarenim konektorima sa mehaničkom spojnicom najviše, između ostalih parametra, utiču marka, odnosno klasa betona, rastojanje konektora od ivice armiranobetonske prizme i prečnik zavrtnja  $i$ , samim tim, mehaničke spojnice. U ovom poglavlju su prikazani numerički FE modeli za proračun u ABAQUS-u dobijeni variranjem navedenih parametra, rezultati numeričkog proračuna na tako formiranim modelima i odgovarajuće poređenje dobijenih rezultata, u cilju ocene relevantnosti pojedinih parametra na nosivost i ponašanje smičućeg spoja koja je predmet istraživanja u okviru ove disertacije.

### **5.2 Geometrijske karakteristike modela i mehaničke karakteristike materijala**

Numerički FE modeli po svojoj dispoziciji i dimenzijama odgovaraju FE modelima tipa FEM\_D i FEM\_E iz predhodnog poglavlja, uz variranje širine armiranobetonske prizme  $B$ , kao što je to prikazano na slici 5.1. S obzirom na dvoosnu simetriju prikazane dispozicije, numerički je modelirana samo četvrtina, predstavljena šrafiranim delom na slici 5.1.





**Slika 5.1** Dispozicija modela za parametarsku analizu

Varijacija širine  $B$  uslovljava i varijaciju osnog rastojanja konektora do ivice prizme  $c$ , s obzirom da je međusobno rastojanje konektora u svim modelima parametarske analize konstantno i iznosi 150 mm, pa je  $c = (B-150)/2$ . Vrednosti variranih dimenzija  $B$  i  $c$  prikazane su u tabeli 5.1 za svaki FE model. Pored širine armiranobetonske prizme  $B$ , u okviru parametarske analize na numeričkim FE modelima varirana je čvrstoća (klasa) betona. Modelima su dodeljivane mehaničke karakteristike koje odgovaraju standardnim klasama betona C27, C32 i C38 [EC2, 2004]. Razmatrana su i dva prečnika zavrtnja M16 i M20, sa odgovarajućim dimenzijama mehaničkih spojnika [Lenton Katalog, 2008]. U tabeli 5.1 navedeni su svi FE modeli obuhvaćeni parametarskom analizom. Naziv modela, u cilju jasnijeg prezentovanja rezultata je komponovan na sledeći način:

$$M[\text{prečnik zavrtnja}]_C[\text{klasa betona}]_B[\text{širina prizme (mm)}]$$

**Tabela 5.1** Geometrijske karakteristike i mehaničke karakteristike materijala modela obuhvaćenih numeričkom parametarskom analizom

| Model        | $B$ | $c$ | Klasa betona | Zavrtnaj    | Mehanička spojnica |                 | Anker         |
|--------------|-----|-----|--------------|-------------|--------------------|-----------------|---------------|
|              |     |     |              | Prečnik $d$ | Prečnik $d_{co}$   | Dužina $l_{co}$ | Prečnik $d_a$ |
|              | mm  | mm  |              | mm          | mm                 | mm              | mm            |
| M16_C27_B300 | 300 | 75  | C27          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C27_B350 | 350 | 100 | C27          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C27_B400 | 400 | 125 | C27          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C27_B450 | 450 | 150 | C27          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C32_B300 | 300 | 75  | C32          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C32_B350 | 350 | 100 | C32          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C32_B400 | 400 | 125 | C32          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C32_B450 | 450 | 150 | C32          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C38_B300 | 300 | 75  | C38          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C38_B350 | 350 | 100 | C38          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C38_B400 | 400 | 125 | C38          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M16_C38_B450 | 450 | 150 | C38          | 16          | 22                 | 59              | 12            |
| M20_C27_B300 | 300 | 75  | C27          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C27_B350 | 350 | 100 | C27          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C27_B400 | 400 | 125 | C27          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C27_B450 | 450 | 150 | C27          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C32_B300 | 300 | 75  | C32          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C32_B350 | 350 | 100 | C32          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C32_B400 | 400 | 125 | C32          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C32_B450 | 450 | 150 | C32          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C38_B300 | 300 | 75  | C38          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C38_B350 | 350 | 100 | C38          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C38_B400 | 400 | 125 | C38          | 20          | 27                 | 93              | 16            |
| M20_C38_B450 | 450 | 150 | C38          | 20          | 27                 | 93              | 16            |

Mehaničke karakteristike betona primenjenih u FE modelima u okviru parametarske analize su funkcija čvrstoće pri pritisku  $f_{cm}$  standardnog cilindra prečnika baze 150 mm i visine 300 mm. Ostale mehaničke karakteristike koje predstavljaju ulazni podatak za numerički proračun, izvedene su prema izrazima (3.4) i (3.5), u poglavlju 3, u skladu sa [EC2, 2004], i prikazane u tabeli 5.2. U istoj tabeli su prikazane i mehaničke karakteristike čelika zavrtnjeva, mehaničkih spojnica i armaturnih ankeri.

**Tabela 5.2** Mehaničke karakteristike materijala  
u FE modelima parametarske analize

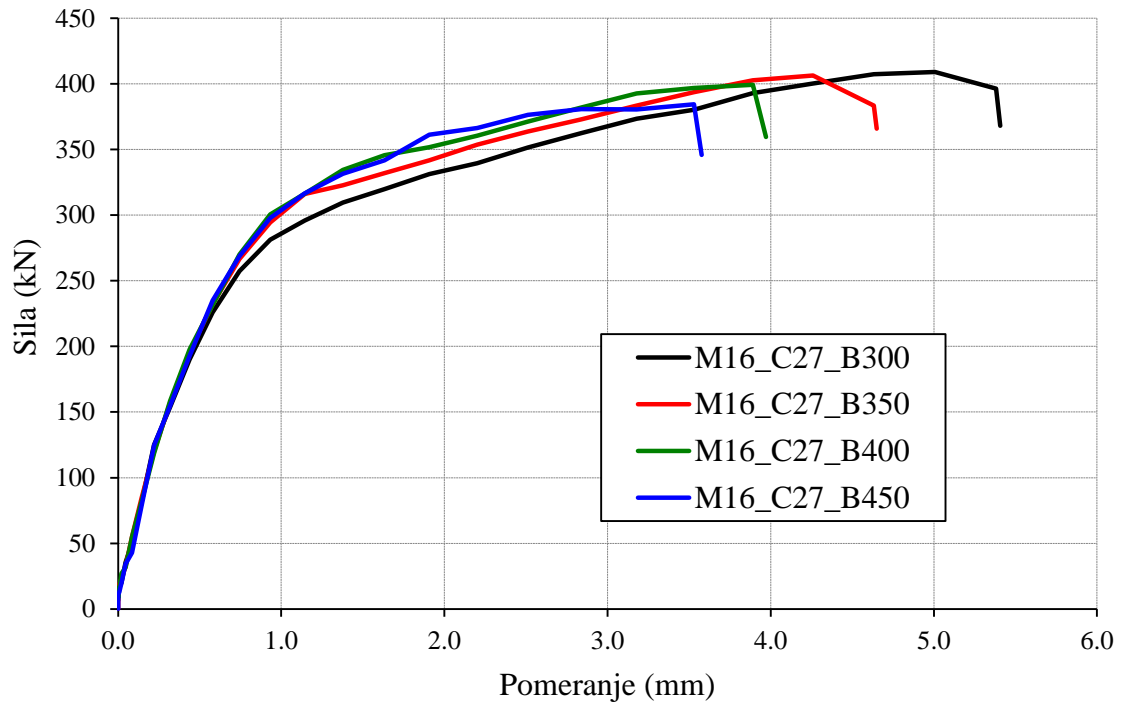
|                    |     |          |           |                 |
|--------------------|-----|----------|-----------|-----------------|
| Beton              |     | $f_{cm}$ | $f_{ctm}$ | $E_{cm}$        |
|                    |     | MPa      | MPa       | MPa             |
|                    | C27 | 27       | 2.14      | 29637           |
|                    | C32 | 32       | 2.50      | 31187           |
| Zavrtnaj           | C38 | 38       | 2.90      | 32837           |
|                    |     | $f_{02}$ | $f_{ub}$  | $\varepsilon_u$ |
|                    |     | MPa      | MPa       | %               |
| Mehanička spojnica |     | 765      | 838       | 20              |
|                    |     | $R_m$    | $R_{p02}$ | $\varepsilon_m$ |
|                    |     | MPa      | MPa       | %               |
| Armaturni anker    |     | 750      | 770       | 8               |
|                    |     | $f_{02}$ | $f_{ub}$  | $\varepsilon_u$ |
|                    |     | MPa      | MPa       | %               |
|                    |     | 400      | 500       | 20              |
|                    |     |          |           | 210             |

### 5.3 Rezultati proračuna na numeričkim FE modelima u okviru parametarske analize

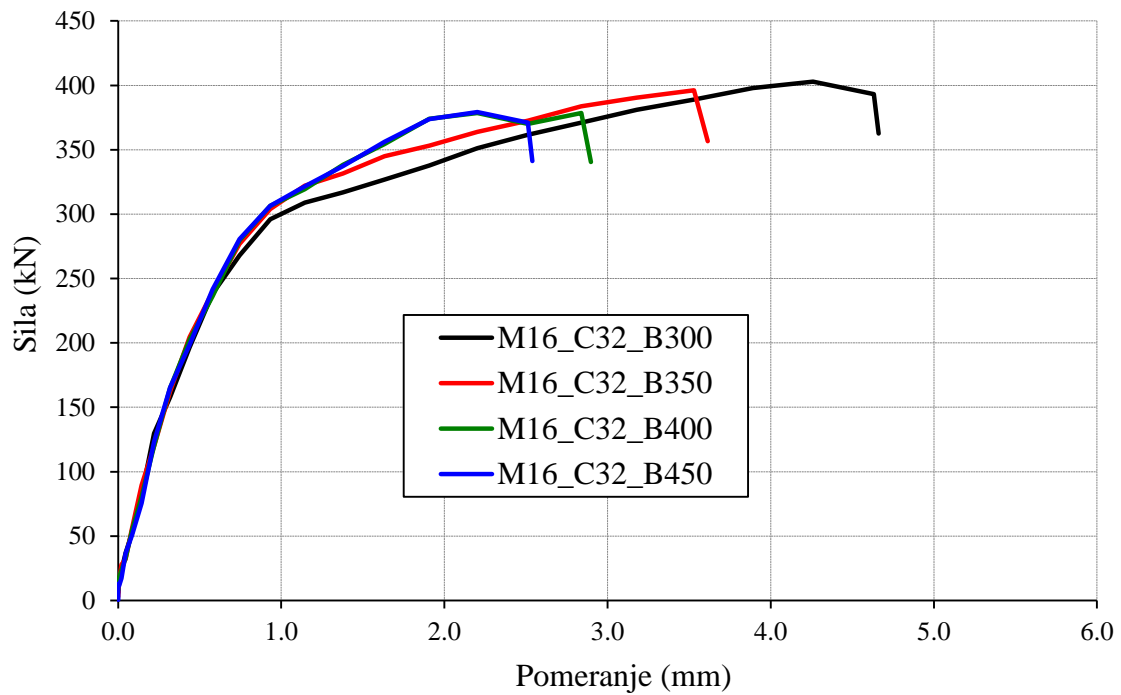
U okviru parametarske analize je sproveden numerički proračun u programu ABAQUS, koji, kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, omogućava analizu granične oblasti loma uz korišćenje nelinearnog ponašanja materijala sa oštećenjem. Sproveden je proračun na svih 24 FE modela, čiji su osnovni parametri i karakteristike prezentovani u tabeli 5.1. Svi modeli su dostigli graničnu nosivost smičućeg konektora po zavrtnju na smicanje, čemu je, kod većeg broja modela, prethodio lom po betonu usled blizine ivice.

U nastavku su prikazani rezultati proračuna u obliku dijagrama koji sadrže krive sila – vertikalno pomeranje. Kao i kod eksperimentalnog ispitivanja uzoraka i numeričke analize na FE modelima u prethodnim poglavljima, prikazano pomeranje predstavlja relativno pomeranje čelične flanše u odnosu na površinu armiranobetonske prizme, na mestu smičućeg konektora, u vertikalnom pravcu. Krive su grupisane tako da su na jednom dijagramu prikazani rezultati za FE modele svih širina AB prizmi  $B$ , dok su ostali parametri identični. Silazna grana dijagrama je prikazana samo do vrednosti sile od  $0.9P_{ult}$ , čime je definisana i granična deformacija  $\delta_u$ , u skladu sa usvojenim definicijama prikazanim na slici 3.27 u poglavlju 3.

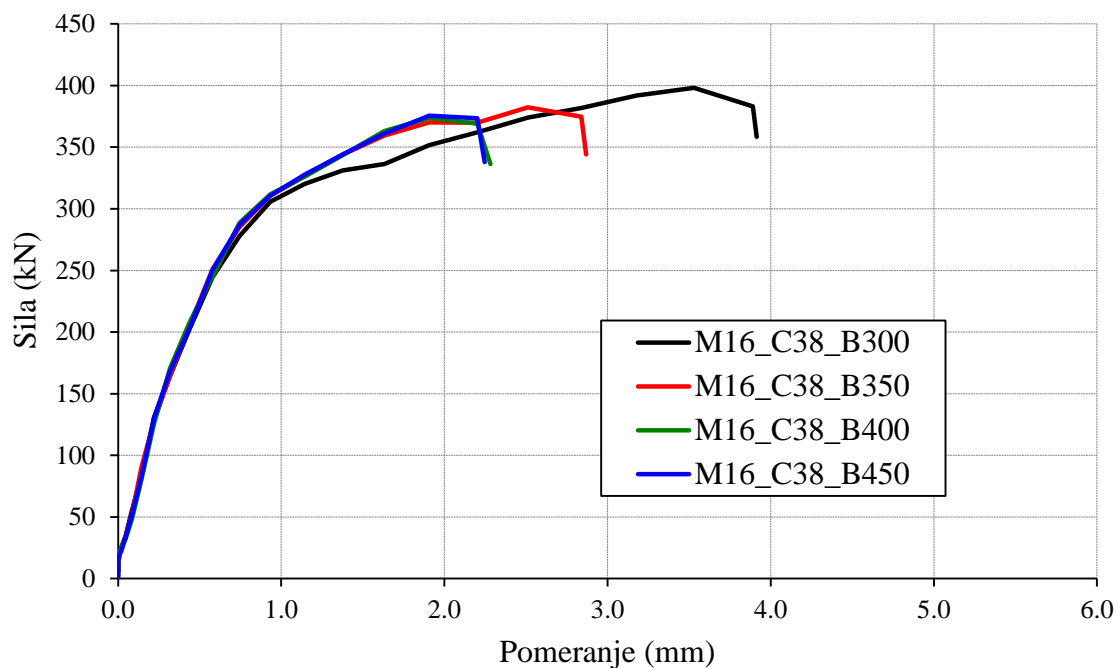
Na slikama 5.2 do 5.4 prikazani su dijagrami sila – vertikalno pomeranje za FE modele za smičućim konektorom sa zavrtnjem M16.



**Slika 5.2** Krive sila – vertikalno pomeranje za FE modele (M16 i C27)

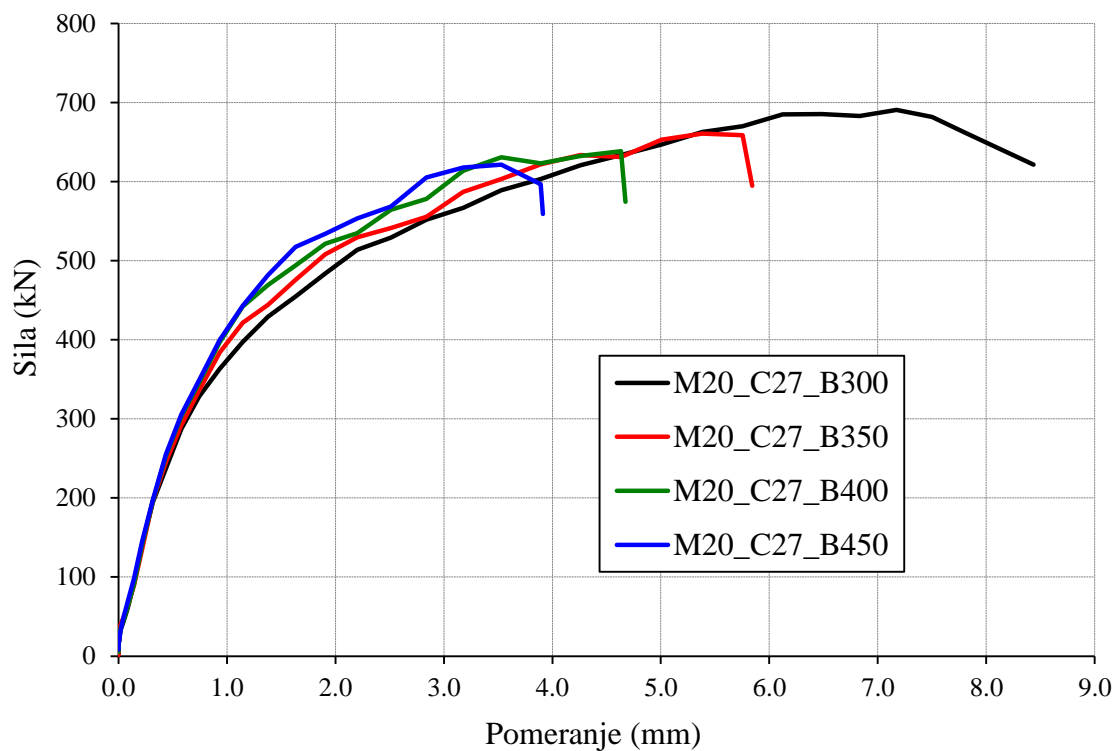


**Slika 5.3** Krive sila – vertikalno pomeranje za FE modele (M16 i C32)

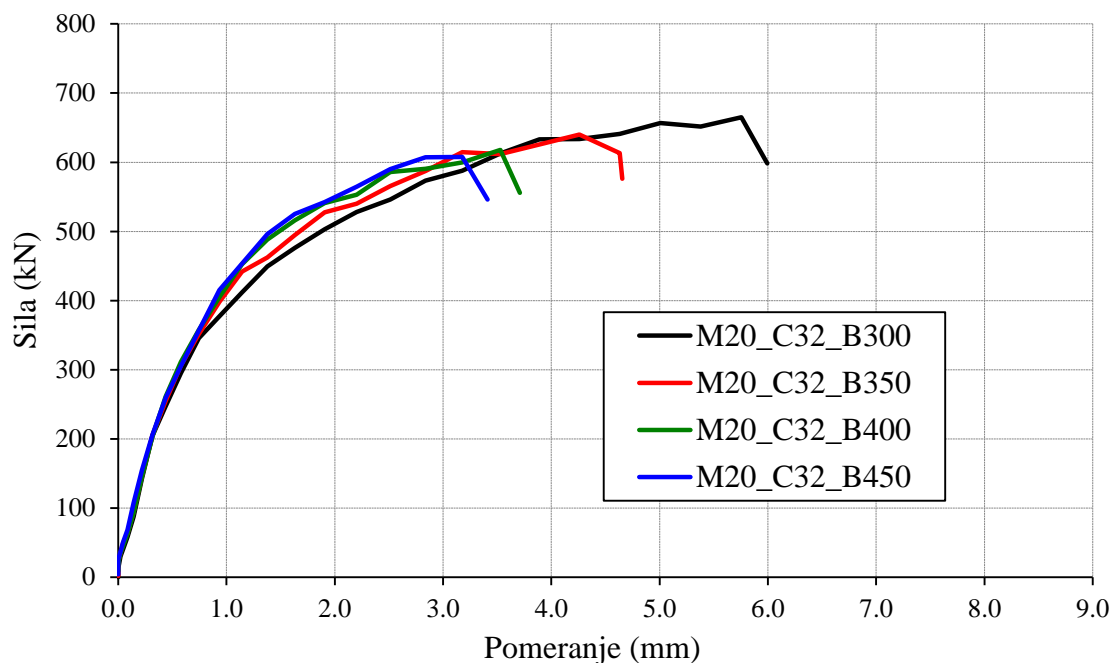


**Slika 5.4** Krive sila – vertikalno pomeranje za FE modele (M16 i C38)

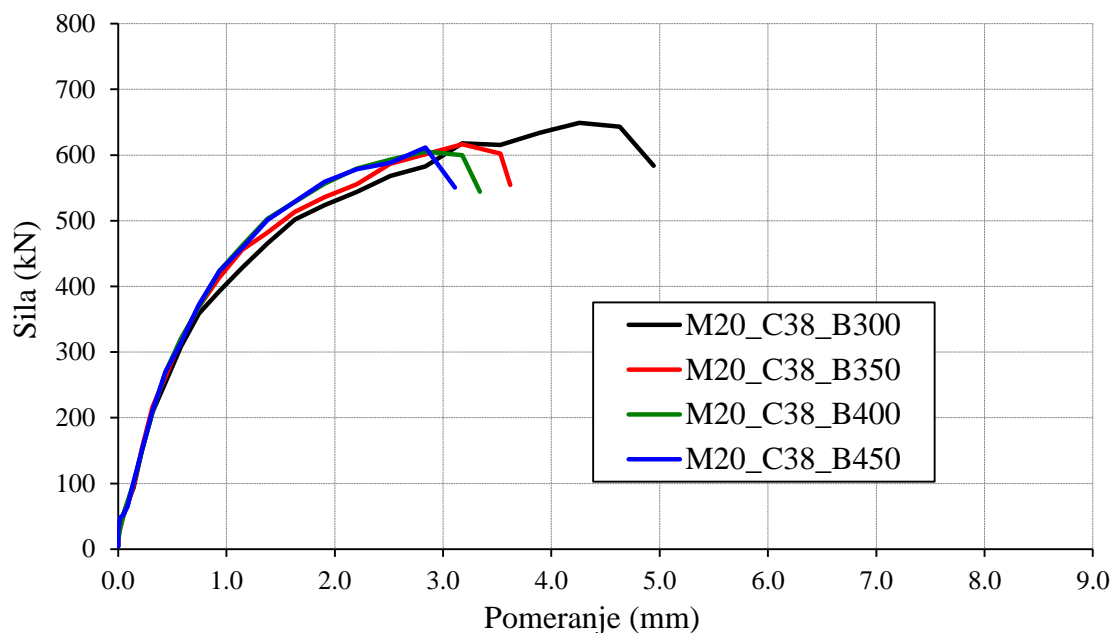
Na slikama 5.5 do 5.7 prikazani su dijagrami sila – vertikalno pomeranje za FE modele za smičućim konektorom sa zavrtnjem M20.



**Slika 5.5** Krive sila – vertikalno pomeranje za FE modele (M20 i C27)



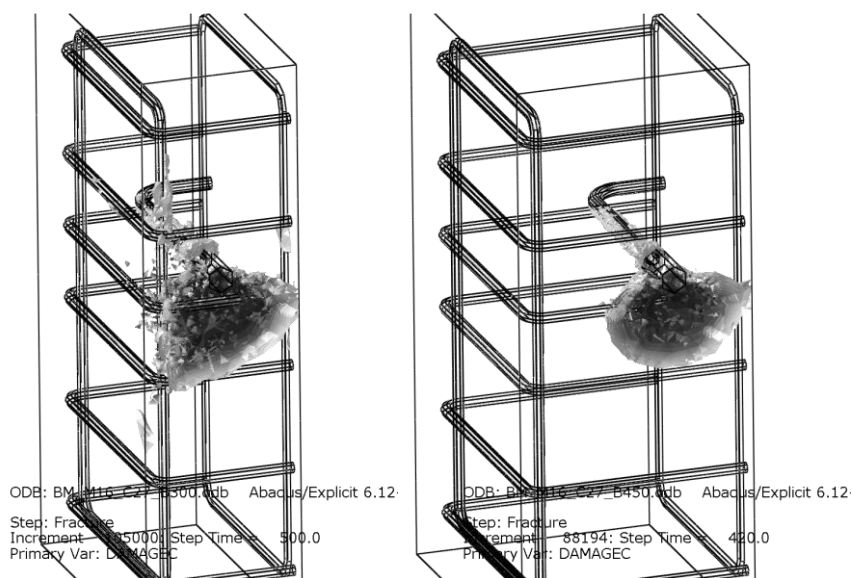
**Slika 5.6** Krive sila – vertikalno pomeranje za FE modele (M20 i C32)



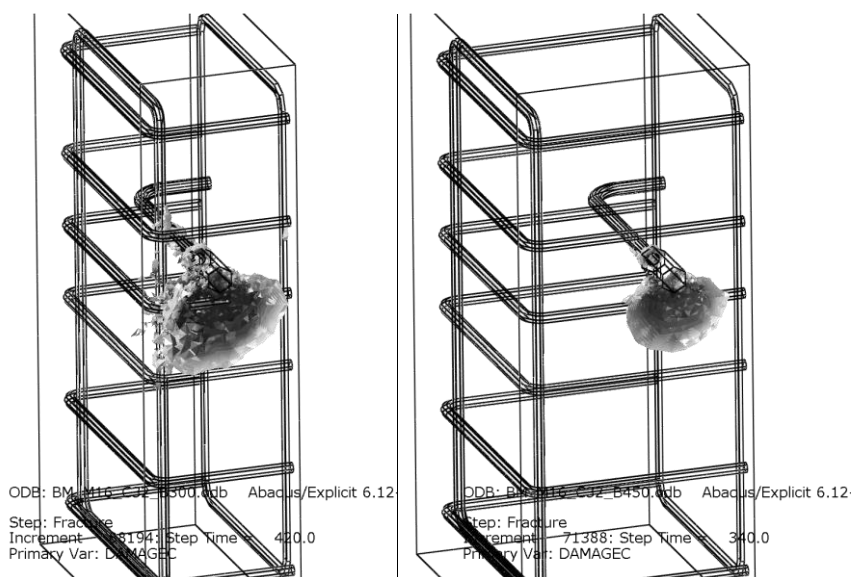
**Slika 5.7** Krive sila – vertikalno pomeranje za FE modele (M20 i C38)

Kao pokazatelj stepena i oblika zone oštećenja pritisnutog betona ispod smičućeg konektora i u blizini ivice armiranobetonske prizme u visini konektora prikazani su dijagrami parametra oštećenja pritisnutog betona  $D_c$  (promenljiva DAMAGEC u ABAQUS-u). Ova veličina je definisana u prethodnom poglavlju, paragraf 4.7.2. Prikazani su dijagrami ove promenljive pred lom smičućeg konektora, za najmanje rastojanje konektora od AB prizme ( $c = 75$  mm (B300, na levoj strani slike)) i

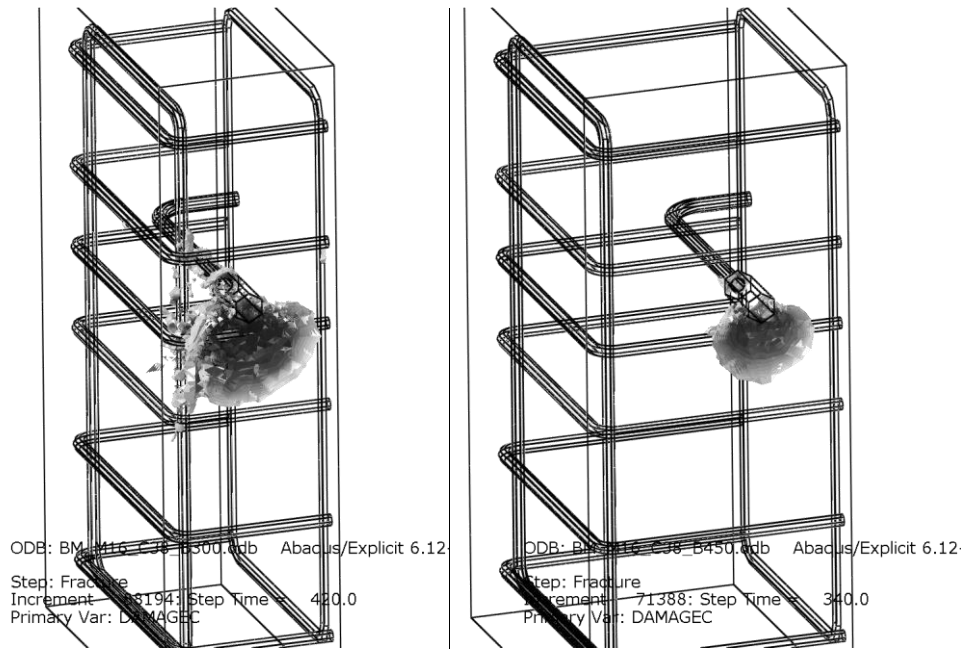
najveće razmatrano rastojanje od konektora do ivice AB prizme ( $c = 150$  mm (B450, na desnoj strani slike)), za sve kombinacije prečnika zavrtnja i klase betona. Oblik i veličina zone oštećenog betona jedan je od pokazatelja da li je došlo do loma po betonu u blizini ivice, pre nego što je dostignuta granična nosivost konektora na smicanje u zavrtnju. Na slikama 5.8 do 5.10 prikazani su dijagrami parametra  $D_c$  za modele sa zavrtnjem M16.



**Slika 5.8** Dijagram parametra oštećenja  $D_c$  za FE modele (M16 i C27)

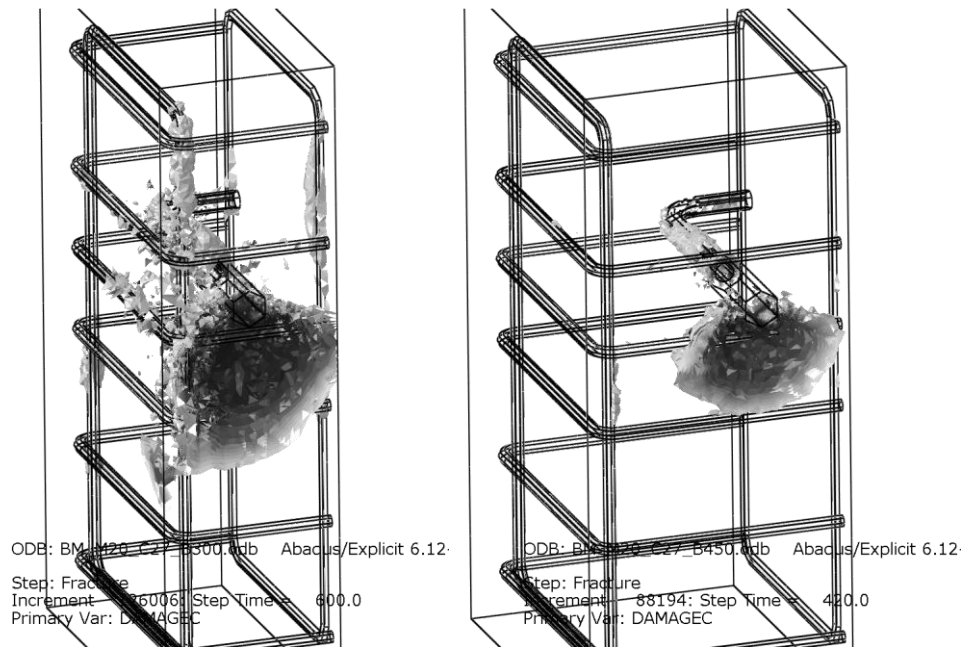


**Slika 5.9** Dijagram parametra oštećenja  $D_c$  za FE modele (M16 i C32)



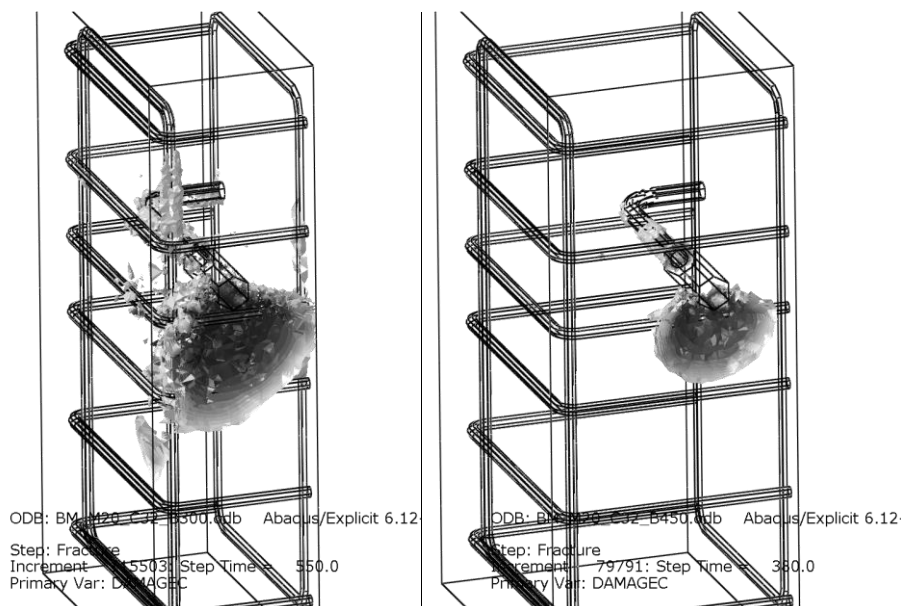
**Slika 5.10** Dijagram parametra oštećenja  $D_c$  za FE modele (M16 i C38)

Na slikama 5.11 do 5.13 prikazani su dijagrami parametra  $D_c$  za modele sa zavrtnjem M20.

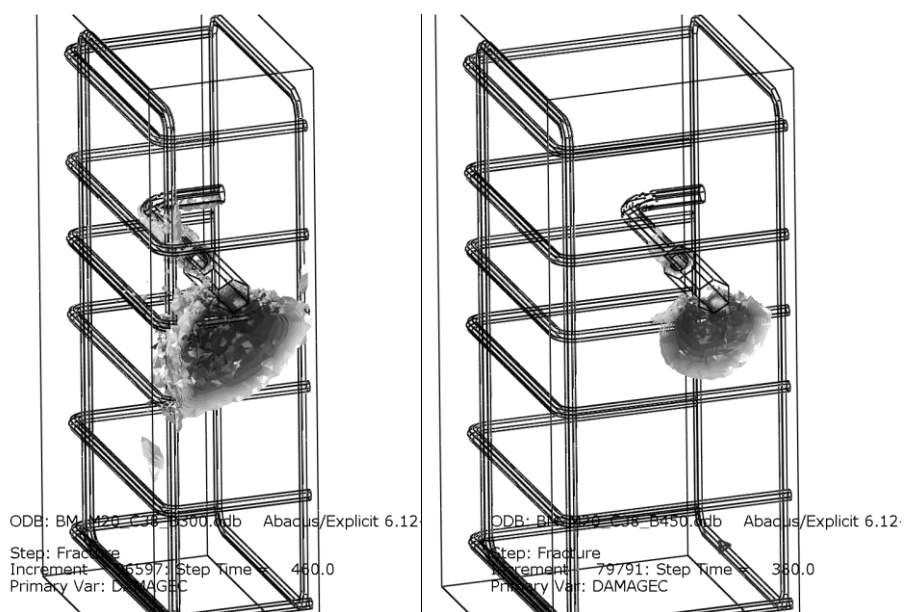


**Slika 5.11** Dijagram parametra oštećenja  $D_c$  za FE modele (M20 i C27)





Slika 5.12 Dijagram parametra oštećenja  $D_c$  za FE modele (M20 i C32)



Slika 5.13 Dijagram parametra oštećenja  $D_c$  za FE modele (M20 i C38)

#### 5.4 Analiza rezultata numeričkog proračuna na FE modelima u okviru parametarske analize

Na osnovu rezultata izvršenog proračuna na FE modelima, analiziran je uticaj razmatranih parametra na graničnu nosivost smičućeg konektora na smicanje po zavrtnju, granična vertikalna pomeranja, kao i eventualnu pojavu dostizanja granične nosivosti po betonu u blizini ivice armiranobetonske prizme.

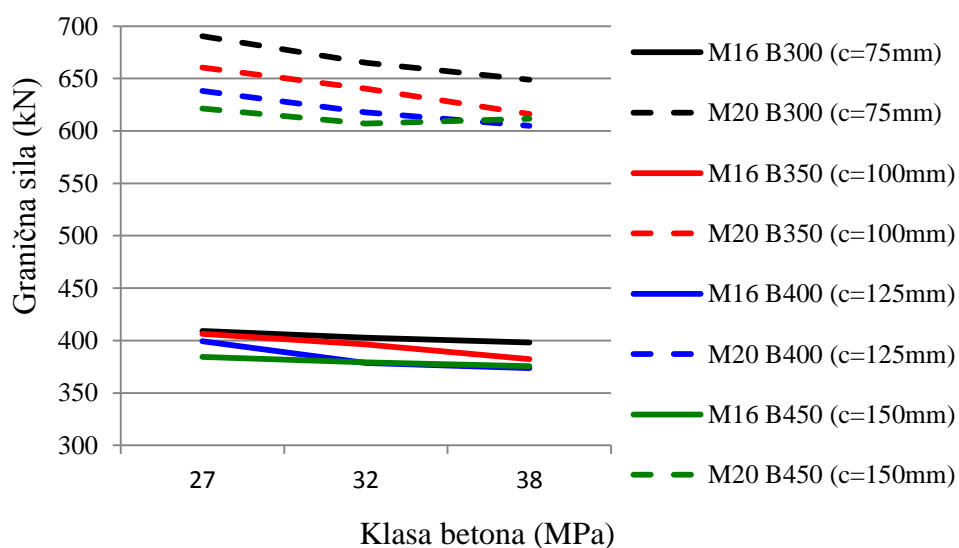
### 5.4.1 Uticaj razmatranih parametara na graničnu nosivost smičućeg konektora na smicanje po zavrtnju

Analizom rezultata numeričkog proračuna u obliku dijagrama sila – vertikalno pomeranje, prikazanih na slikama 5.2 do 5.7 određene su maksimalne granične sile  $P_{ult}$  i maksimalna pomeranja  $\delta_u$ . Vrednosti su prikazane u tabeli 5.3

**Tabela 5.3** Granična nosivost i maksimalna pomeranja za FE modele

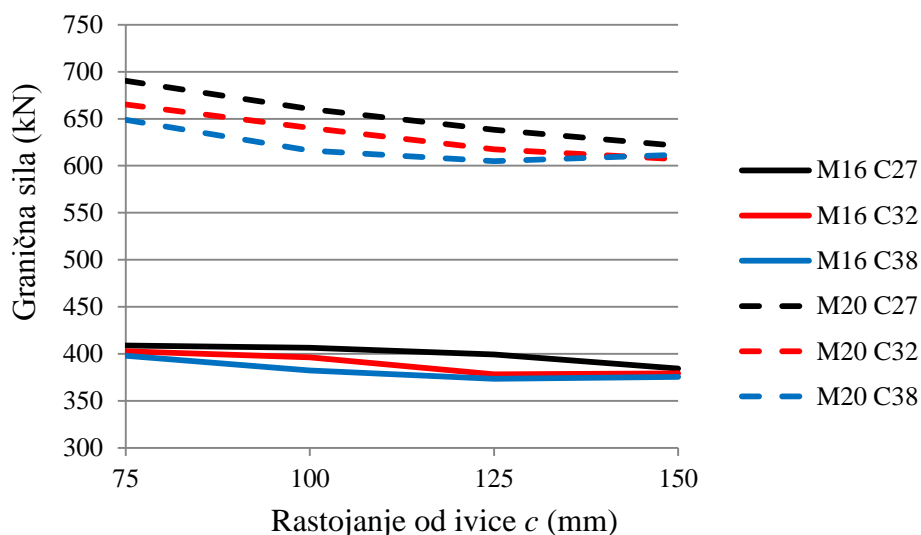
| Model        | $P_{ult}$ | $\delta_u$ | Model        | $P_{ult}$ | $\delta_u$ |
|--------------|-----------|------------|--------------|-----------|------------|
|              | kN        | mm         |              | kN        | mm         |
| M16_C27_B300 | 409.0     | 5.41       | M20_C27_B300 | 690.4     | 8.44       |
| M16_C27_B350 | 406.4     | 4.65       | M20_C27_B350 | 660.5     | 5.84       |
| M16_C27_B400 | 399.4     | 3.97       | M20_C27_B400 | 638.3     | 4.67       |
| M16_C27_B450 | 384.4     | 3.58       | M20_C27_B450 | 621.4     | 3.91       |
| M16_C32_B300 | 402.8     | 4.66       | M20_C32_B300 | 665.1     | 5.99       |
| M16_C32_B350 | 396.2     | 3.61       | M20_C32_B350 | 640.2     | 4.65       |
| M16_C32_B400 | 378.4     | 2.90       | M20_C32_B400 | 617.6     | 3.71       |
| M16_C32_B450 | 379.2     | 2.54       | M20_C32_B450 | 607.0     | 3.41       |
| M16_C38_B300 | 398.2     | 3.91       | M20_C38_B300 | 648.8     | 4.94       |
| M16_C38_B350 | 382.3     | 2.87       | M20_C38_B350 | 616.2     | 3.62       |
| M16_C38_B400 | 373.7     | 2.28       | M20_C38_B400 | 604.9     | 3.34       |
| M16_C38_B450 | 375.6     | 2.25       | M20_C38_B450 | 611.7     | 3.11       |

Uticaj klase betona, odnosno čvrstoće pri pritisku  $f_{cm}$  na graničnu nosivost konektora je analiziran na dijagramu prikazanom na slici 5.14.



**Slika 5.14** Uticaj klase betona na graničnu nosivost smičućeg konektora sa spojnicom

Uticaoj osnovog rastojanja konektora od ivice armiranobetonske prizme  $c$  na graničnu nosivost konektora analiziran je na dijagramu na slici 5.15.

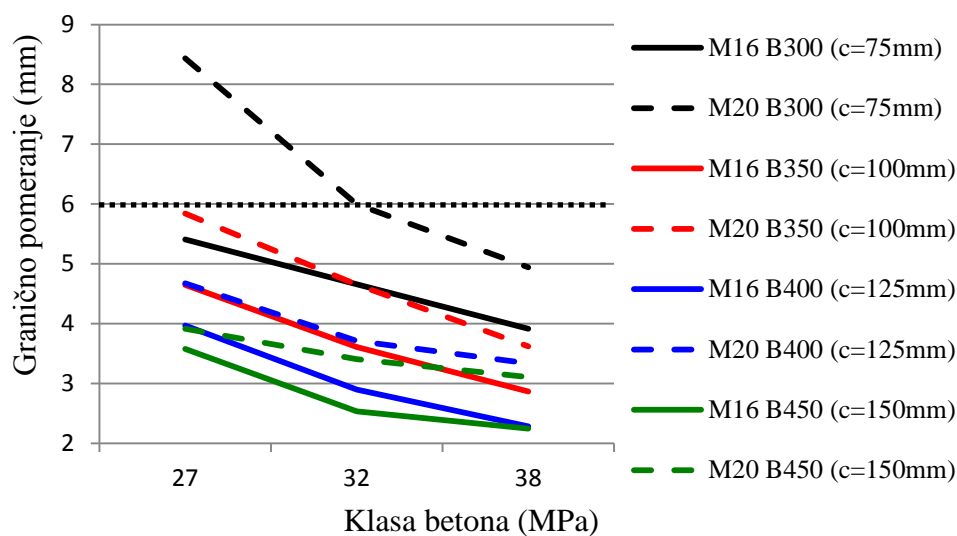


**Slika 5.15** Uticaoj rastojanja od ivice  $c$  na graničnu nosivost smičućeg konektora sa spojnicom

Može se zaključiti da čvrstoća betona pri pritisku i rastojanje konektora do ivice neznatno utiču na graničnu nosivost smičućeg konektora za mehaničkom spojnicom, što je i očekivano s obzirom da konektor dostiže graničnu nosivost smicanjem u zavrtnju. Blagi pad nosivosti sa porastom čvrstoće betona i povećanjem rastojanja, posledica je manjih pomeranja, što je izraženije kod konektora sa zavrtnjem M20. Pri manjim pomeranjima lom zavrtnja je bliži čistom smicanju, dok se kod većih pomeranja javlja savijanje i zatezanje zavrtnja, što vodi ka složenom lomu i većoj graničnoj nosivosti. Zavisnost nosivosti konektora na smicanje od veličine vertikalnih pomeranja, razmatrana je pri analizi rezultata eksperimentalnih ispitivanja uzoraka u poglavlju 3. Ovaj efekat je detaljno obradio [Pavlović, 2014] na primeru smičućih konektora od ubetoniranih čeličnih zavrtnjeva.

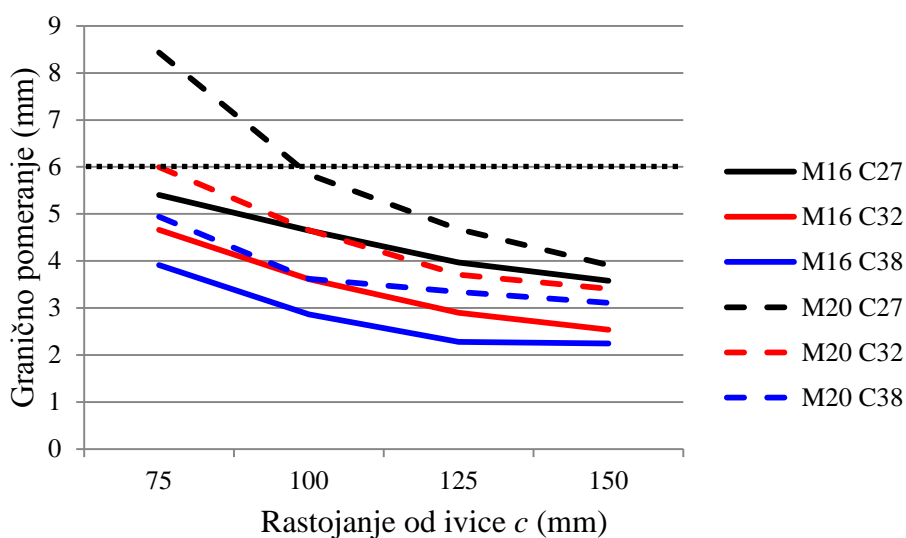
#### 5.4.2 Uticaoj razmatranih parametara na maksimalna vertikalna pomeranja smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom

Uticaoj klase betona, odnosno čvrstoće pri pritisku  $f_{cm}$  na maksimalna granična vertikalna pomeranja konektora je analiziran na dijagramu prikazanom na slici 5.16.



**Slika 5.16** Uticaj klase betona na maksimalno granično pomeranje smičućeg konektora sa spojnicom

Uticaj osnovnog rastojanja konektora od ivice armiranobetonske prizme  $c$  na maksimalna granična vertikalna pomeranja konektora je analiziran na dijagramu prikazanom na slici 5.17.



**Slika 5.17** Uticaj rastojanja od ivice  $c$  na maksimalno granično pomeranje smičućeg konektora sa spojnicom

Za razliku od granične nosivosti, maksimalna granična pomeranja značajno zavise od čvrstoće betona pri pritisku. Pri manjim čvrstoćama betona (beton klase C27, slike 5.8 i 5.11) oštećenja ispod konektora su veća, zona plastifikovanog betona šira, pa su samim tim i vertikalne granične deformacije konektora veće. Ovaj efekat je izraženiji

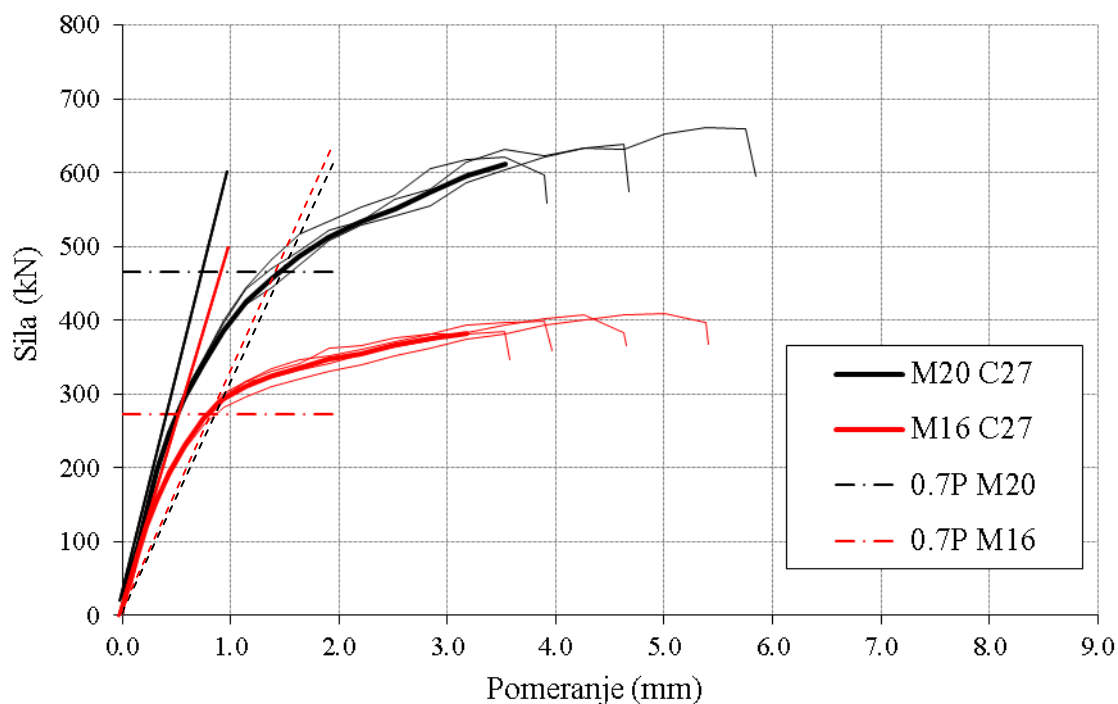
kod konektora sa zavrtnjem M20, gde su pri većim silama veća lokalna oštećenja pritisnutog betona ispod konektora.

Sličan efekat na maksimalna granična pomeranja ima i rastojanje konektora od ivice armiranobetonske prizme. Pomeranja su obrnuto srazmerna rastojanju konektora od ivice  $c$ . Na dijagramima parametra oštećenja betona pri pritisku  $D_c$  na slikama 5.8 do 5.13 se mogu uočiti značajno veća oštećenja betona za rastojanje od ivice  $c = 75$  mm (leva strana na slikama) nego u slučaju kada je to rastojanje  $c = 150$  mm (desna strana na slikama). Kao što je to istaknuto u analizi rezultata eksperimentalnih ispitivanja uzoraka i rezultata numeričkog proračuna na FE modelima u prethodnim poglavljima, pri manjim rastojanjima konektora od ivice prizme nastaju oštećenja u obliku kosih prslina i pukotina prema ivici, koja vode ka lomu po betonu usled blizine ivice. Kose pukotine i lom usled blizine ivice značajno povećavaju maksimalna granična pomeranja  $\delta_u$  smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom.

Sa prikazanih dijagrama krivih sila – vertikalno pomeranje (slike 5.2 do 5.7) sledi da inicijalna krutost smičućeg konektora ne zavisi od rastojanja konektora od ivice, jer u ranim fazama opterećenja nema plastifikacije i oštećenja, pa krutost konektora zavisi samo od krutosti zavrtnja.

Pri daljem prirastu opterećenja krutost konektora pada, i dijagram prelazi u nelinearnu oblast. Nivo sile koji odgovara prelasku u nelinearnu oblast zavisi od rastojanja konektora do ivice. Konektori sa manjim rastojanjem od ivice pri nižem opterećenju prelaze u nelinearnu oblast. Može se takođe uočiti i da je taj prelaz praćen naglom promenom ugla tangente na krivu, dakle naglim padom krutosti. Pad krutosti posledica je dostizanja nosivosti po betonu usled blizine ivice. Pad krutosti nakon loma usled blizine ivice je uočen i na krivama sila – vertikalno pomeranje dobijenim eksperimentalnim ispitivanjem uzoraka serija A i B (slika 3.52 u poglavlju 3).

Na slici 5.18 prikazano je poređenje dijagrama sila - vertikalno pomeranje za modele sa klasom betona C27, za prečnika zavrtnja M16 i M20. Na dijagramima su prikazane prave linije koje odgovaraju krutostima za dve grupe modela sa različitim prečnicima zavrtnja i odgovarajućih mehaničkih spojnica.



**Slika 5.18** Krutost smičućih konektora M16 i M20 za klasu betona C27

Na dijagramima na slici 5.18 je punim pravim linijama prikazana početna krutost  $k_{ini}$  za konektore sa zavrtnjem prečnika M16 (crvena linija) i M20 (crna linija). Odgovarajućim isprekidanim linijama su prikazane krutosti koje odgovaraju  $0.7P_{ult}$ , kako to propisuje [EC4, 2004] u Aneksu A, gde je krutost moždanika  $k_{sc}$  definisana kao:

$$k_{sc} = 0.7 P_{Rk} / s \quad (5.1)$$

gde je:

$P_{Rk}$  karakteristična nosivost moždanika,

$s$  proklizavanje dobijeno standardnim "pushout" testom pri sili  $0.7P_{Rk}$ .

Za određivnje vrednosti  $0.7P_{ult}$  korišćena je srednja vrednost za četiri numerička modela sa zavrtnjem istog prečnika. U tabeli 5.4 je prikazana srednja vrednost početne krutost  $k_{ini}$ , kao i srednja krutost  $k_{sc}$  za dva prečnika zavrtnja. Može se zaključiti da se prikazane krutosti za konektore sa zavrtnjem M16 i M20 praktično ne razlikuju, odnosno da krutost konektora ne zavisi od prečnika zavrtnja.

**Tabela 5.4** Krutost smičućih konektora za beton C27

|     | $0.7P_{ult}$ | $s$   | $k_{sc}$ | $k_{ini}$ |
|-----|--------------|-------|----------|-----------|
|     | kN           | mm    | kN/mm    | kN/mm     |
| M16 | 457          | 1.377 | 332      | 590       |
| M20 | 273          | 0.850 | 321      | 510       |

U tabeli 5.5 upoređene su krutosti  $k_{sc}$  za različita rastojanja konektora od ivice betona  $c$ . Kao što se može očekivati, krutost konektora raste sa rastojanjem od ivice betona.

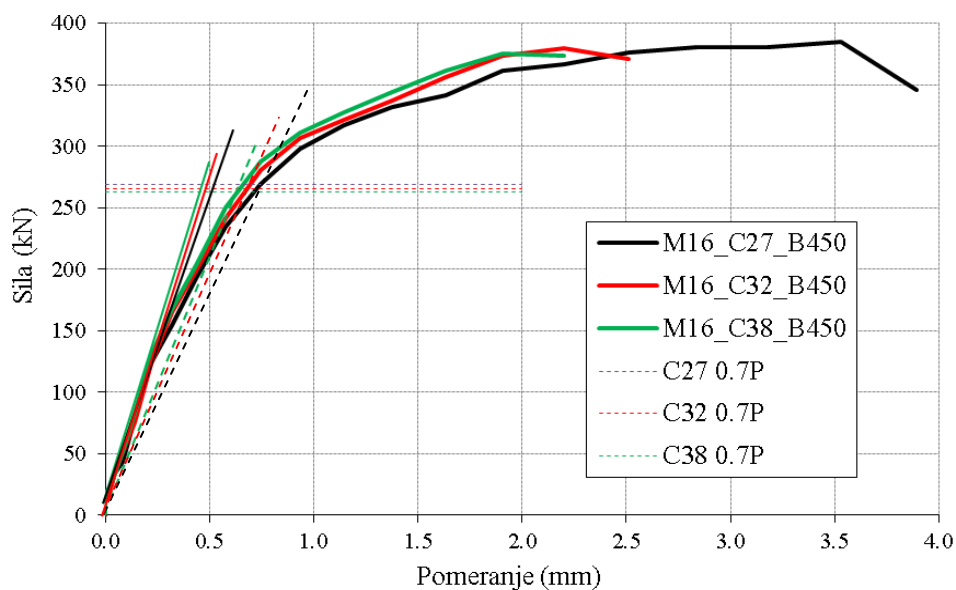
**Tabela 5.5** Krutost smičućih konektora u zavisnosti od odstojanja od ivice

| $c$ | M16          |       |          | M20          |       |          |
|-----|--------------|-------|----------|--------------|-------|----------|
|     | $0.7P_{ult}$ | $s$   | $k_{sc}$ | $0.7P_{ult}$ | $s$   | $k_{sc}$ |
| mm  | kN           | mm    | kN/mm    | kN           | mm    | kN/mm    |
| 75  | 286          | 1.006 | 284      | 483          | 1.903 | 254      |
| 100 | 284          | 0.866 | 328      | 462          | 1.525 | 303      |
| 125 | 280          | 0.804 | 348      | 447          | 1.187 | 377      |
| 150 | 242          | 0.746 | 324      | 435          | 1.096 | 397      |

U tabeli 5.6 upoređene su krutosti  $k_{sc}$  za različita klase betona za konektor sa zavrnjem M16, udaljen 150mm od ivice betona, gde se može videti da krutost konektora neznatno raste sa povećanjem klase betona, odnosno čvrstoće betona pri pritisku. Na slici 5.19 prikazano je poredenje krutosti za konektore iz tabele 5.6.

**Tabela 5.6** Krutost smičućih konektora u zavisnosti od klase betona

|     | $0.7P_{ult}$ | $s$   | $k_{sc}$ |
|-----|--------------|-------|----------|
|     | kN           | mm    | kN/mm    |
| C27 | 269          | 0.746 | 361      |
| C32 | 265          | 0.722 | 367      |
| C38 | 263          | 0.706 | 373      |

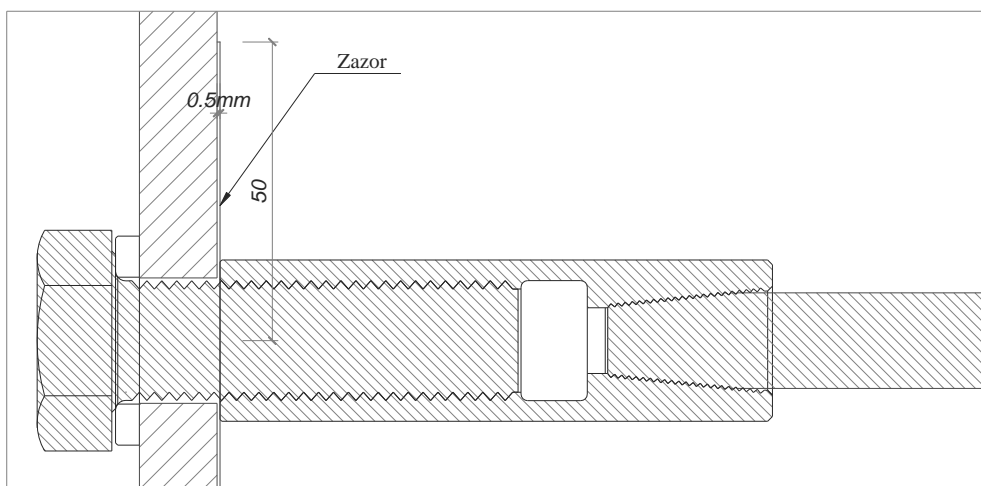


**Slika 5.19** Poređenje krutosti smičućih konektora u zavisnosti od klase betona

Na osnovu prikazanih rezultata parametarske numeričke analize, kada je krutost konektora u pitanju, se može zaključiti da krutost  $k_{sc}$ , definisana izrazom (5.1) praktično ne zavisi od prečnika zavrtnja, u manjoj meri raste sa povećanje čvrstoće betona pri pritisku, a nešto značajnije sa rastojanjem konektora od ivice betona. Sve proračunate krutosti su znatno veće od 100 kN/mm što je orjentaciona vrednost definisana u Evrokodu 4 za moždanike prečnika 19 mm u punoj betonskoj ploči.

### 5.5 Uticaj zazora između čelične flanše i površine betona na ponašanje i nosivost smičućeg konektora

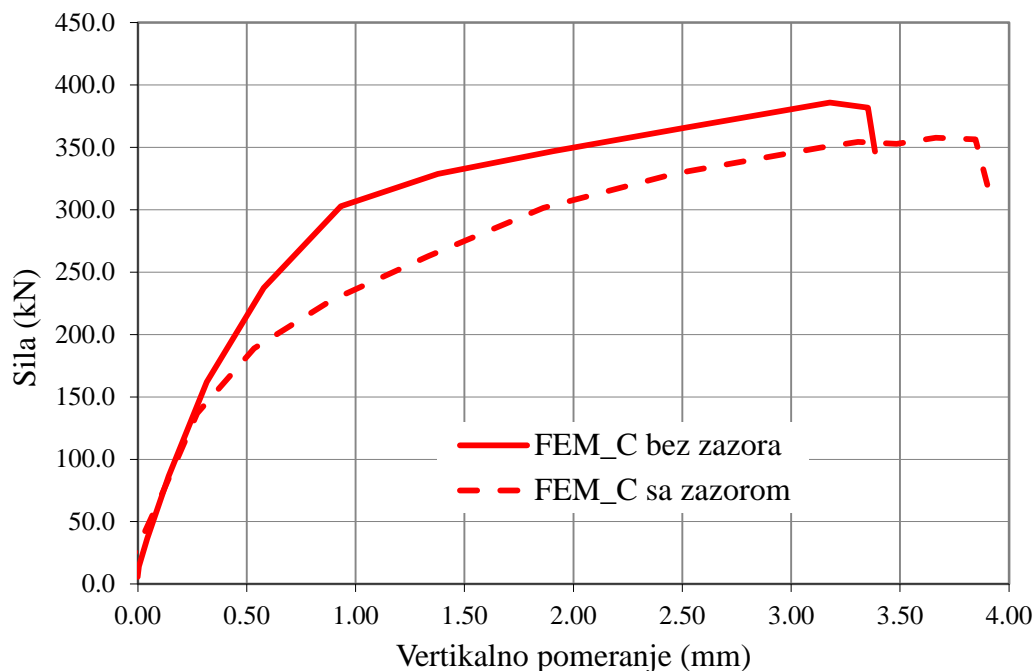
Kao dodatni deo parametarske analize u ovom poglavlju razmotren je i uticaj zazora između čelične flanše i površine betona na nosivost i ponašanje konektora. U prethodnom poglavlju, u okviru numeričke analize, zazor prikazan na slici 5.20 postavljen je u FE modelima FEM\_D i FEM\_E, kako bi se tačnije modelirala nesavršenost u oplati odgovarajućih uzoraka u okolini konektora.



**Slika 5.20** Zazor između flanše i betona u okolini konektora

Uticaj zazora je analizirana na modelu FEM\_C čija su geometrija i mehaničke karakteristike materijala prikazane u prethodnom poglavlju. Na slici 5.21 poređena je kriva sila - vertikalno pomeranje za model FEM\_C sa i bez zazora. Na dijagramu se može uočiti da prisustvo zazora dovodi do ranijeg pada krutosti, što je posledica nesprečenih bočnih deformacija pritisnutog betona ispod konektora u ranijim fazama opterećenja, čime se smanjuje efekat utezanja betona, koji je detaljnije opisan u narednom poglavlju (paragraf 6.3.1).





**Slika 5.21** Uticaj zazora na dijagram sila – vertikalno pomeranje (FEM\_C)

Pri porastu opterećenja i plastifikaciji betona dolazi do dovoljno velikih bočnih pomeranja koja dostižu širinu zazora, i pojavljuje se efekat sprečenog bočnog širenja na mnogo višem nivou opterećenja nego u modelu bez zazora. Naknadno sprečavanje bočnog širenja betona, pri višim nivoima opterećenja, doprinosi porastu nosivosti i utiče da pad granične nosivosti kod modela sa zazorom ne bude značajan. U slučaju modela FEM\_C, prikazanom na slici 5.20, pad nosivosti iznosi 7.3%. Prisustvo zareza dovodi do znatno manje krutosti pri nižim opterećenjima, nešto manje granične nosivosti  $P_{ult}$  i većih maksimalnih graničnih pomeranja  $\delta_u$ . U prikazanom slučaju (slika 5.21), prirast maksimalnog pomeranja iznosi 15.1%. Ovde treba napomenuti da za uslove eksploatacije, što u slučaju modela FEM\_C daje silu od  $P_{expl}$  (približno određenu na osnovu paragrafa 6.5, za lom smicanjem po zavrtnju),

$$P_{expl} = 0.75 P_{ult} / (\gamma_{M,S} \gamma_{G+P}) = 0.75 \cdot \frac{385.9}{(1.15 \cdot 1.4)} = 180 \text{ kN} \quad (5.2)$$

Pri sili  $P_{expl}$  razlika u pomeranjima između dve prikazane krive iznosi 21%. Značajno je da ova vrednost  $P_{expl}$  odgovara nivou sile kada počinje pad krutosti i nelinearno ponašanje na modelu sa zazorom. Sledi zaključak da imperfekcije u izradi armiranobetonske prizme, modelirane zazorom od 0.5mm imaju uticaja i u fazi eksploatacije u obliku većih pomeranja usled ranog početka plastifikacije neutegnutog betona ispod konektora.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja uzoraka, numeričke analize FE modela, kao i parametarske analize u okviru ove disertacije, predstavljaju osnov za detaljnu analizu načina loma, nosivosti i deformabilnosti smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom, koja izvršena u narednom poglavlju.

## **6 Nosivost i ponašanje smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom**

### **6.1 Uvod**

Na osnovu rezultata eksperimentalnog ispitivanja uzoraka, numeričke analize na FE modelima, a zatim i odgovarajuće parametarske analize, prikazanih u prethodnim poglavljima, moguće je izvršiti detaljnu analizu lokalnog naprezanja smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom, kao i lokalna naprezanja betona u okolini konektora tokom prirasta opterećenja i dostizanja graničnog stanja nosivosti. Ovakva analiza je sprovedena u okviru ovog poglavlja, u cilju definisanja, pre svega, mogućih načina loma ispitivanog konektora.

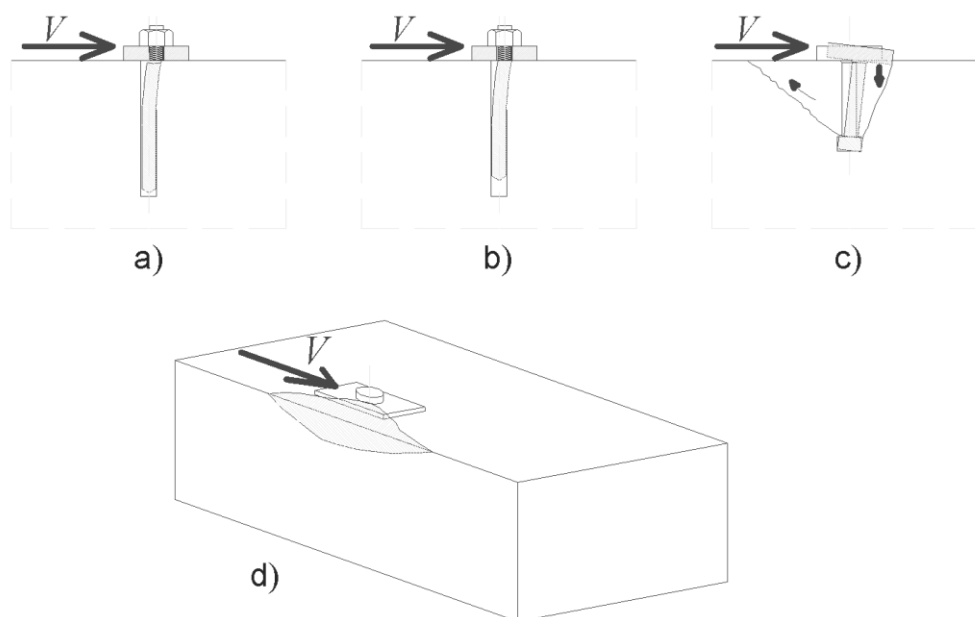
Na bazi rezultata numeričkog proračuna metodom konačnih elemenata u ABAQUS-u, na FE modelima kalibrisanim u skladu sa rezultatima eksperimentalnog ispitivanja, definisan je način prenošenja opterećenja kroz elemente razmatrane smičuće veze preko konektora sa mehaničkom spojnicom.

Konačni rezultat analize lokalnih naprezanja u okolini konektora, koja podrazumeva i određivanje vremena nastanka, oblika i obima oštećenja, jeste definisanje načina proračuna nosivosti ispitivanih smičućih konektora u okviru ove disertacije. Razmatrana je mogućnost primene modela za proračun nosivosti sličnih vrsta smičućih konektora (zavareni moždanici sa glavom, prethodno ubetonirani zavrtnjevi i naknadno ugrađeni (bušeni) ankeri) koji su razvijeni u prethodnim istraživanjima i prisutni u naučnoistraživačkoj i stručnoj literaturi i odgovarajućim tehničkim normama.

### **6.2 Način loma smičućeg konektora**

Razne vrste ankera za vezu čeličnih i armiranobetonskih elemenata u čeličnim konstrukcijama opterećenih na smicanje mogu imati funkciju smičućih konektora, i pri porastu opterećenja, mogu na različite načine da dostignu granično stanje nosivosti, odnosno lom. Način loma ankera najviše zavisi od njegove vrste (zavareni moždanici sa glavom, zavrtnji ili bušeni ankeri), oblika, prečnika, načina ugrađivanja i mesta ugrađivanja u beton (osno rastojanje ankera od ivice betona). Na slici 6.1 su prikazani

načini loma smičućih konektora (ankera opterećenih smičućom silom  $V$ ), kako to definiše [CEB-FIP, 2011].



**Slika 6.1** Mogući načini loma ankera opterećenog na smicanje [CEB-FIP, 2011]

Na slici pod a) je prikazan lom zavrtnja na smicanje, neposredno ispod čelične ploče. Pod b) je prikazan lom izvlačenjem ankera, kada se usled velikih deformacija ankera u pravcu sile javi komponenta sile u pravcu ose ankera (efekat lančanice) koja savlada sile athezije, odnosno sidrenje ankera u betonu. Lom usled izvaljivanja betona ("pryout") prikazan je pod c). Ovakav lom nastaje kada se, usled dejstva glave moždanika suprotno od smera sile  $V$ , jave glavni naponi zatezanja koji dostignu čvrstoću betona pri zatezanju, nakon čega sledi odvajanje i izvaljivanje kupastog tela betona neposredno iza ankera. Primer ovog efekta je prikazan na slici 2.3. Ovakav lom je uobičajen za relativno kratke moždanike, sa odnosom efektivne dužine prema prečniku manjem od 4.5 [Anderson et al., 2005]. Način loma prikazan pod d) predstavlja lom usled blizine ivice betona, pri dejstvu sile paralelno sa ivicom

Lom usled blizine ivice betona u slučaju kada sila deluje upravno na slobodnu ivicu betona (slika 2.24), ovde nije prikazan jer ne odgovara dispoziciji ispitivanih uzoraka u okviru ove teze.

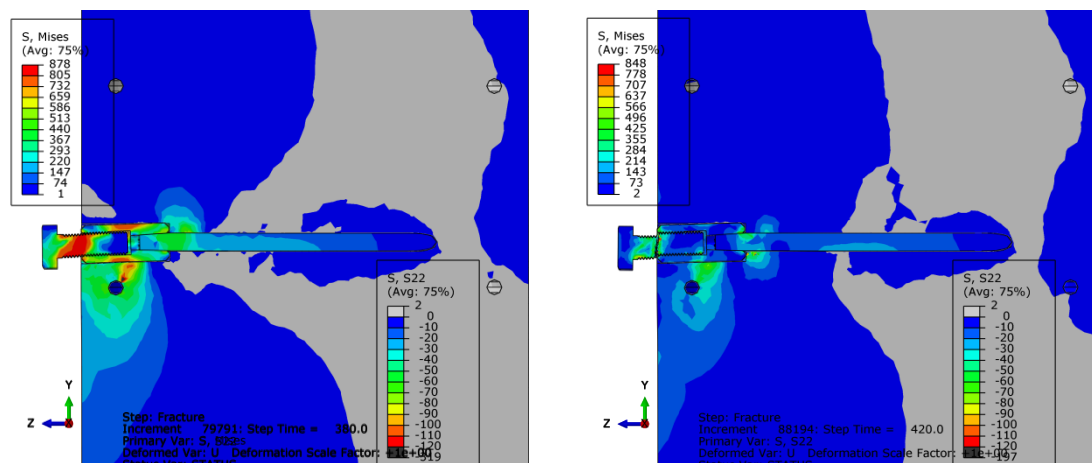
Za smičuće konektore sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom, koji su predmet ovog istraživanja, se ne može očekivati lom izvlačenjem, jer je armaturni anker projektovan i usvojen dovoljne dužine da obezbedi sidrenje u armiranobetonski element. Takođe, smičući konektori ispitivani u ovom radu se ne sidre glavom (kao što

je to slučaj kod zavarenih moždanika i ubetoniranih zavrtnjeva), koja bi inicirala "pryout" efekat i izvaljivanje betona. Iako se odnos dužine i minimalnog prečnika ispitivanih mehaničkih spojnica, prema podacima iz tabele 3.1, kreće u granicama od  $59/22=2.7$  do  $79/22=3.59$ , što je manje od 4.5, i odgovara kratkim moždanicima, koji su podložni ovakvom načinu loma, to nije od značaja, jer spojnica predstavlja integralni deo smičućeg konektora zajedno sa dobro usidrenim ankerom u nastavku spojnice. Nosivost ankera na izvaljivanje betona se definiše kao funkcija istog ankera pri zatezanju na otkidanje kupe zategnutog betona. S obzirom na dužinu ankera ispitivanog konektora, otkidanje kupe nije moguće. Zajednički rad mehaničke spojnice i armaturnog ankera pri smičućem opterećenju detaljno će biti razmatran u narednim tačkama.

Na osnovu prethodnog, za ispitivanu dispoziciju uzoraka i vrstu smičućeg konektora, može se očekivati da granično stanje bude dostignuto lomom usled blizine ivice betona, i/ili lomom zavrtnja na smicanje.

### 6.3 Analiza naprezanja smičućeg spoja u numeričkom modelu

Na osnovu rezultata numeričkog proračuna na FE modelima u ABAQUS-u moguće je sprovesti detaljniju analizu naprezanja smičućeg spoja, odnosno naprezanja pojedinih elemenata smičućeg konektora (zavrtnaj, mehanička spojnica i armaturni anker). Na slici 6.2 prikazano je, u vertikalnom preseku kroz konektor, na deformisanom modelu, stanje naprezanja u smičućem konektoru (Mizesovi naponi), i u okolnom betonu (vertikalna komponenta napona pritiska S22) neposredno pre i posle loma zavrtnja na smicanje, kao rezultat proračuna na FEM\_A.

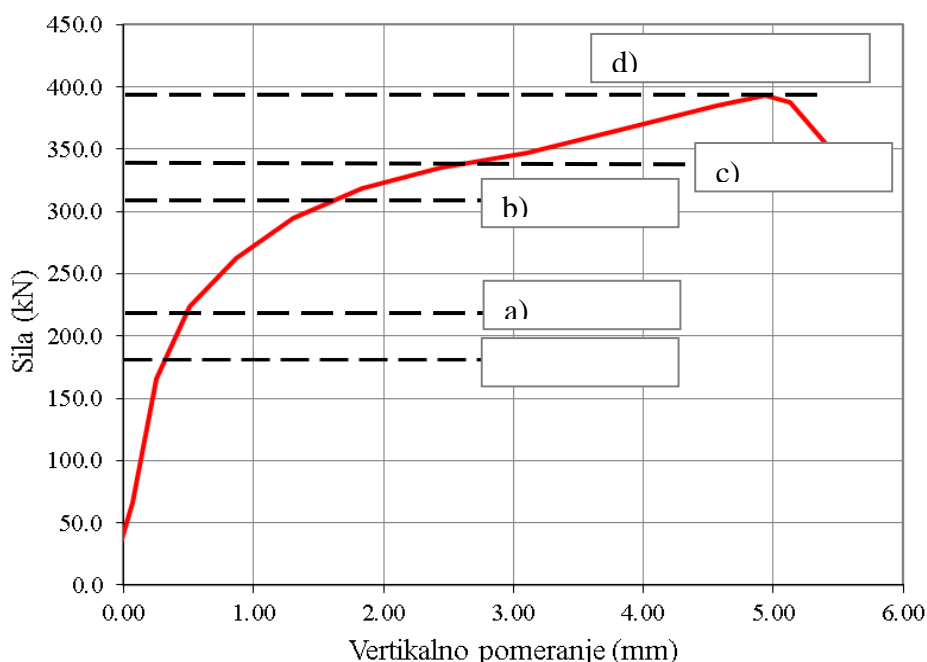


**Slika 6.2** Slika naprezanja u konektoru i okolnom betonu u neposredno pre (levo) i posle loma (dwsno) zavrtnja na smicanje (FEM\_A)

Analizom je, pored elemenata smičućeg konektora, obuhvaćen i beton u okolini konektora, u cilju definisanja oblika naponskog polja, njegovog razvoja i promene tokom nanošenja opterećenja, zatim nastanka oštećenja i dostizanja graničnog stanja. Na osnovu definsanja oblika i veličine zone napregnutog betona u okolini konektora, moguće je i odrediti efektivnu dužinu konektora na kojoj se sile smicanja sa konektora prenose na okolni beton, koja predstavlja jednu od ključnih veličina za kvantifikovanje njegove nosivosti. Analiziran je i efekat trenja između čelične flanše i armiranobetonske prizme, kao i udeo trenja u ukupnoj nosivosti smičućeg konektora.

### 6.3.1 Lokalna naprezanja betona u okolini konektora

Na osnovu rezultata proračuna na FE modelima u ABAQUS-u, analiziran je razvoj naprezanja u betonu u okolini smičućeg konektora na primeru rezultata numeričkog proračuna za FEM\_A. Posmatrano je stanje naprezanja za četiri nivoa smičuće sile  $P$ , i prikazano na dijagramu na slici 6.3, od kojih poslednji (d) odgovara sili pri kojoj dolazi do loma zavrtnja  $P_{ult}$ . Vrednost  $P_{expl}$  je određena u skladu sa (5.2) i paragrafom 6.5.

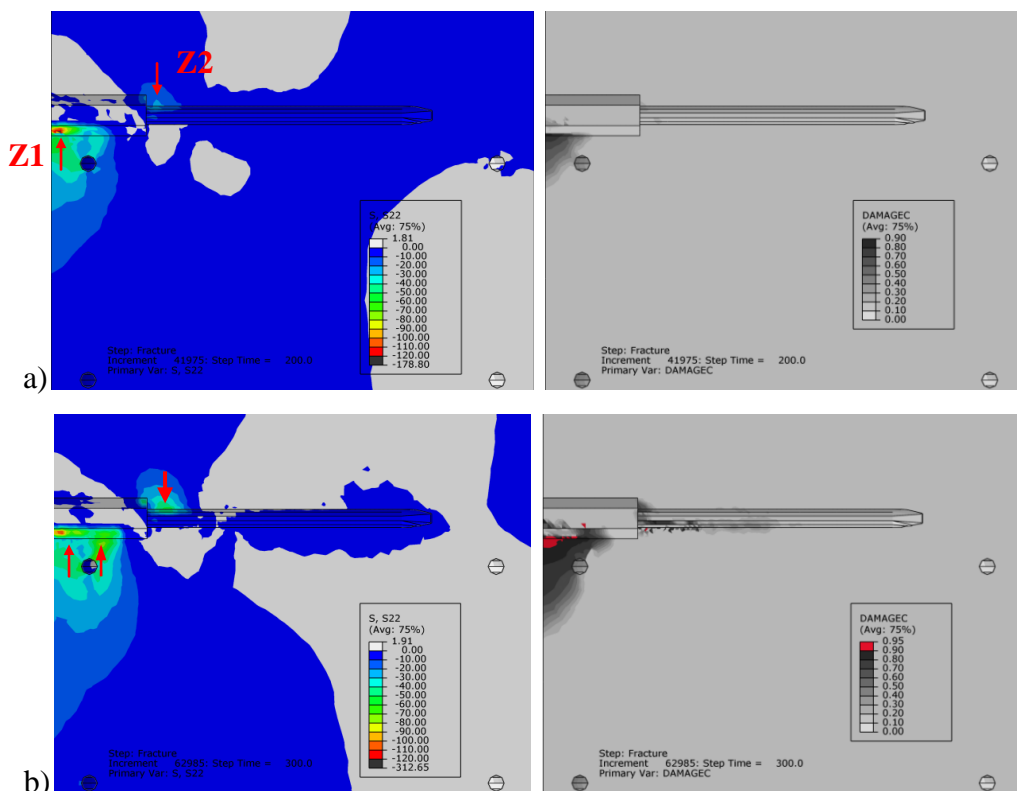


**Slika 6.3** Nivoi opterećenja pri kojima je analizirano naprezanje u betonu oko konektora

Prikazane sile se, u skladu sa dipozicijom uzorka, raspodeljuju na četiri konektora. Odgovarajuća stanja naprezanja prikazana su na slikama 6.4 i 6.5, na nedeformisanom modelu. Na levoj strani je prikazana vertikalna komponenta napona u

betonu (S22), a na desnoj prikaz vrednosti parametra oštećenja betona pri pritisku  $D_c$  (DAMAGEC). Nivoima opterećenja a) do d) sa slike 6.3 odgovaraju dijagrami napona i oštećenja respektivno na slikama 6.4 i 6.5.

Uočljive su dve zone koncentracije naprezanja. Prva zona, na slici 6.4a označena sa Z1 se nalazi ispod konektora uz ivicu betona. Druga zona Z2 je iznad konektora, na kraju mehaničke spojnice, i, svojim većim delom zahvata armaturni anker.



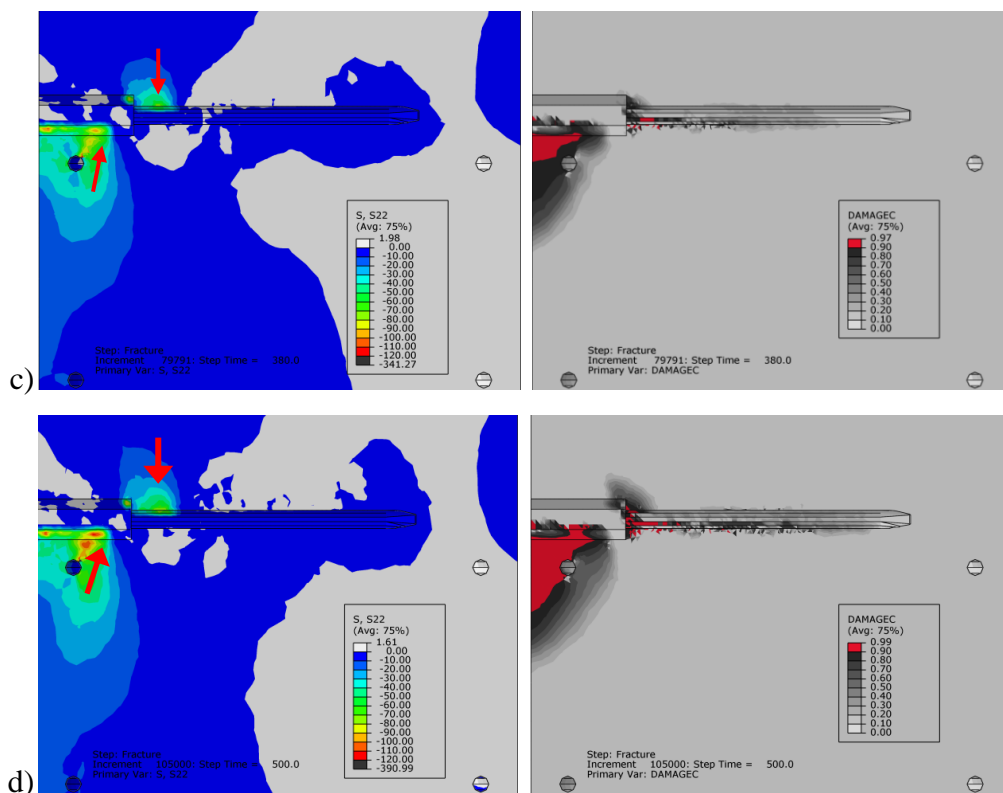
**Slika 6.4** Razvoj napona i oštećenja u betonu u okolini konektora pri nižem nivou opterećenja

Pri nižem nivou sile (nivo označen sa a), slika 6.4), koji odgovara kraju elastičnog dela krive sila – vertikalno pomeranje, koncentracija napona pritiska, i lokalna plastifikacija betona, se javlja u zoni Z1 uz samu ivicu preseka. U zoni Z2 se javljaju naponi pritiska u betonu, koji na kontaktu sa konektorom daju reaktivno opterećenje suprotnog smera od onog u Z1. Rezultante ta dva opterećenja su u ravnoteži sa spoljnom smičućem silom i momentom savijanja koji spoljna sila izaziva na smičućem konektoru.

Pri prirastu opterećenja (nivo sile označen sa b), slika 6.4), širi se oblast plastifikacije u zoni Z1, a rezultanta reaktivnog opterećenja na konektor se pomera od

ivice preseka, što prati povećanje naprezanja u zoni Z2. U uskom delu uz ivicu preseka javlja se potpuno oštećenje pritisitnog betona.

Dalji prirast opterećenja (nivo sile označen sa c), slika 6.5), dovodi do proširenja punog oštećenja pritisitnog betona u zoni Z1 na ceo zaštitni sloj, a rezultanta reaktivnog opterećenja se pomera prema unutrašnjoj polovini mehaničke spojnice.



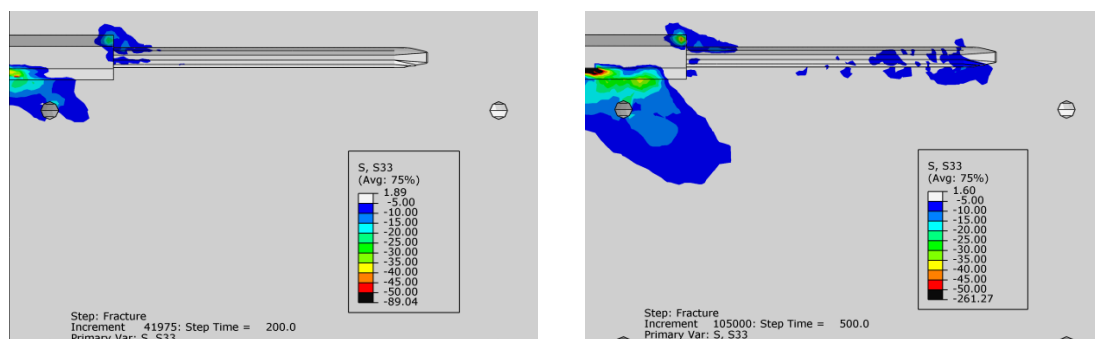
**Slika 6.5** Razvoj naprezanja i oštećenja u betonu u okolini konektora pred lom zavrtnja

Ovo pomeranje dalje smanjuje krak između rezultatata reaktivnog opterećenja sa jedne i druge strane konektora, što, uz prirast spoljne sile, dovodi do značajnijeg prirasta naprezanja u zoni Z2. Treba uočiti da tom prilikom nema značajnog proširenja zone Z2 u pravcu ose smičućeg konektora.

Pred sam lom zavrtnja na smicanje (nivo sile označen sa d), slika 6.5), rezultanta reaktivnog opterećenja na konektor pomera se prema unutrašnjoj trećini mehaničke spojnice, kao posledica punog oštećenja zaštitnog sloja betona, i jednog dela betona iznad i unutar uzengije koja se nalazi neposredno ispod mehaničke spojnice. Formira se pritisnuta dijagonala od uzengije, prema mehaničkoj spojnici. Pravac ove dijagonale je određen unutrašnjim granicom oštećenog betona (kosa granica crvene površine na slici 6.5, d) desno). Opisani sistem prenošenja sila sa smičućeg konektora na okolni beton unutar dela preseka obuhvaćenog uzengijama, omogućava dalji prirast spoljne sile i



posle punog oštećenja zaštitnog sloja betona, pogotovu kada nastane lom usled blizine ivice preseka. Sila raste sve do dostizanja nosivosti zavrtnja na smicanje. Lokalno, u betonu ispod spojnice se dostižu veoma visoke vrednosti napona pritiska – preko 100 MPa, što je posledica troosnog stanja napona. Na slici 6.6 prikazan je razvoj horizontalnog napona (S33) ispod mehaničke spojnice pri nižem nivou opterećenja (levo) i pred lom zavrtnja na smicanje (desno).



**Slika 6.6** Razvoj horizontalnog napona u betonu u okolini konektora

Prikazani naponi dostižu relativno visoke vrednosti jer flanša čeličnog profila sprečava bočna horizontalna širenja betona u ovoj zoni. iz tog razloga, bočna naprezanja daju efekat utezanja betona, omogućavaju nastajanje troosnog stanja napona, a time i lokalno dostizanje visokih vrednosti napona pritiska u betonu. Bočni pritisak betona na flanšu značajno uvećava efekte trenja između flanše i betona u zoni ispod konektora. Ovaj efekat je razmotren u paragrafu 6.3.4.

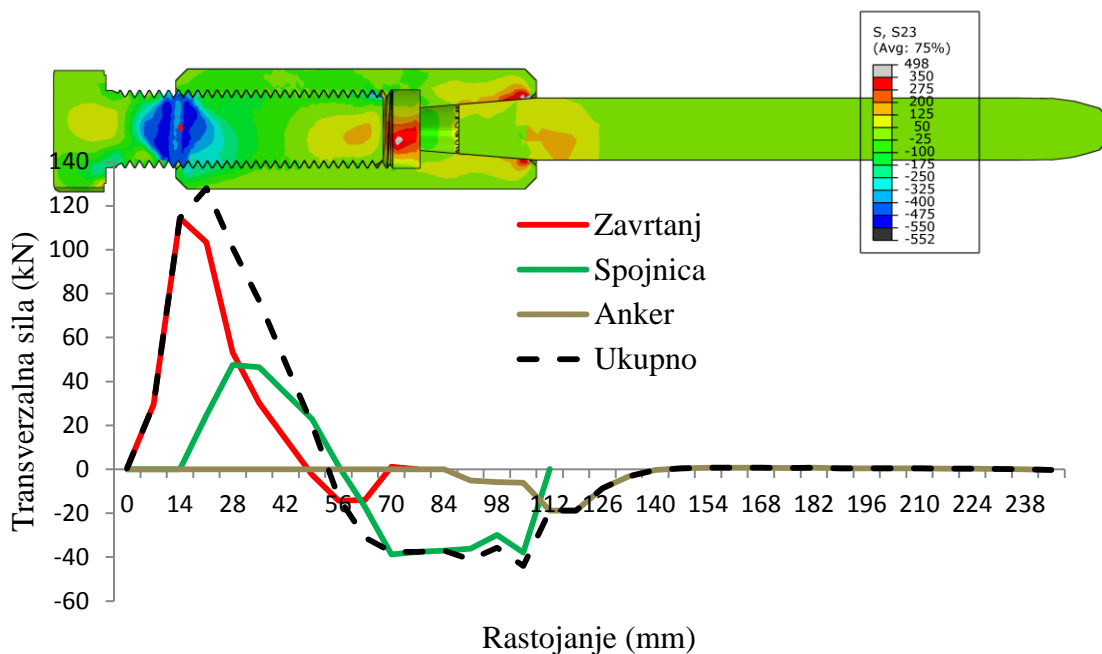
Visok nivo oštećenja betona u zoni Z1, ispod mehaničke spojnice, značajno umanjuje krutost okolnog betona kao vertikalnog oslonca na koji se, pri dejstvu spoljne sile, mehanička spojnica oslanja, što se može uporediti sa prelaskom spojnice u statički sistem konzole. Opterećenje se na spojnicu prenosi preko zavrtnja, na donji zid cilindra spojnice, što dovodi do zatezanja u bočnim zidovima spojnice i do savijanja spojnice u celini. Naponi zatezanja u zidovima su, uz napone smicanja, razlog nastanka oštećenja u jednom broju spojnica koja su se javila nakon eksperimentalnog ispitivanja uzoraka (slike 3.48 do 3.50). Naprezanje spojnica je detaljno razmatrano u narednim tačkama ovog poglavlja.

### 6.3.2 Analiza naprezanje smičućeg konektora

Analizirane su sile u presecima za pojedine elemente smičućeg konektora, nastale usled dejstva spoljašnje smičuće sile i interakcije konektora i okolnog betona.

Sile u preseku – normalna sila, moment savijanja i transverzalna sila, dobijene su integracijom podužnih i poprečnih napona u izabranim poprečnim presecima svih elemenata smičućeg konektora u trenutku pred lom zavrtnja na smicanje. Na slici 6.7 prikazani su dijagrami sila u presecima za smičući konektor iz modela FEM\_E.

Dijagram transverzalnih sila je prikazan na slici 6.7, kao i dijagram smičućih napona S23 pred lom zavrtnja na smicanje (u nedeformisnom obliku).



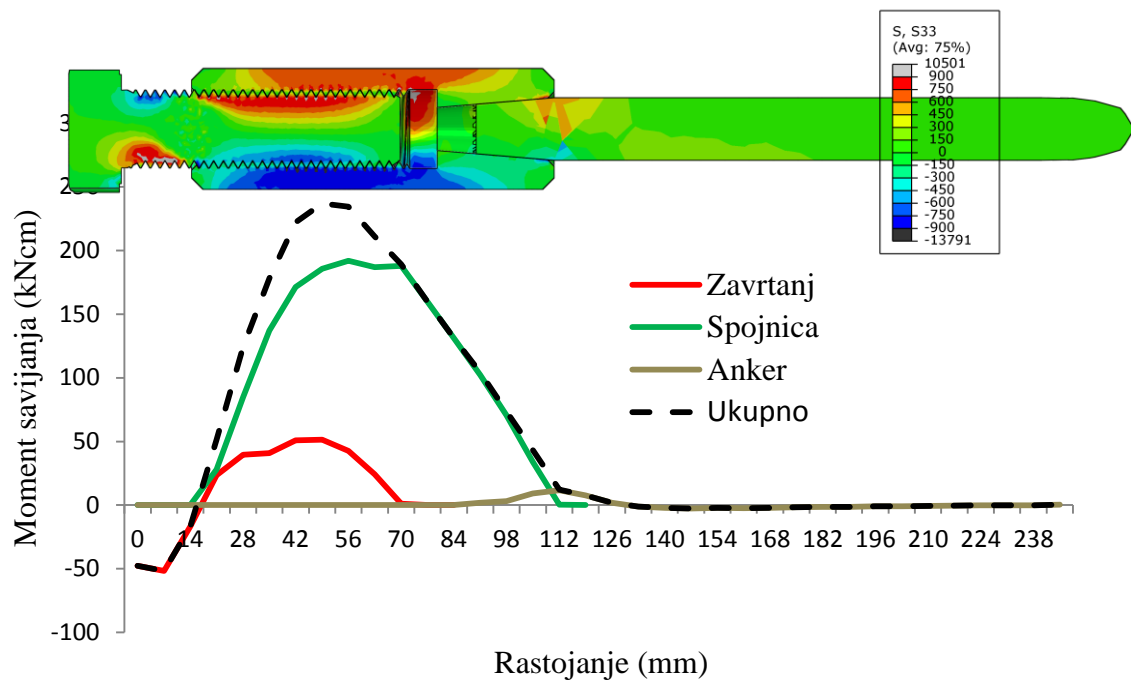
**Slika 6.7** Dijagram trasverzalnih sila u presecima komponenata konektora

Najveći deo smicanja se prenosi kroz zavrtnaj na mestu smičiče ravni između flanše čeličnog profila i betonske prizme, uz nešto manji doprinos mehaničke spojnice. Smicanje se u spojnici javlja i na njenom drugom kraju, gde se prenosi poprečno naprezanje od reaktivnog opterećenja u zoni Z2 (prema dijagramina na slikama 6.4 i 6.5).

Deformacija smičućeg konektora, kao što je prikazano u prethodnoj tački, usled plastifikacije i oštećenja pritisnutog betona, dovodi do obrtanja i savijanja elemenata konektora. Na slici 6.8 prikazan je dijagram momentata savijanja u konektoru. Najveće savijanje se javlja u mehaničkoj spojnici, zbog pomeranja rezultante rektivnog opterećenja na donjoj strani spojnice, dalje od ivice betona (slika 6.5, d) levo), pri prirastu opterećenja.

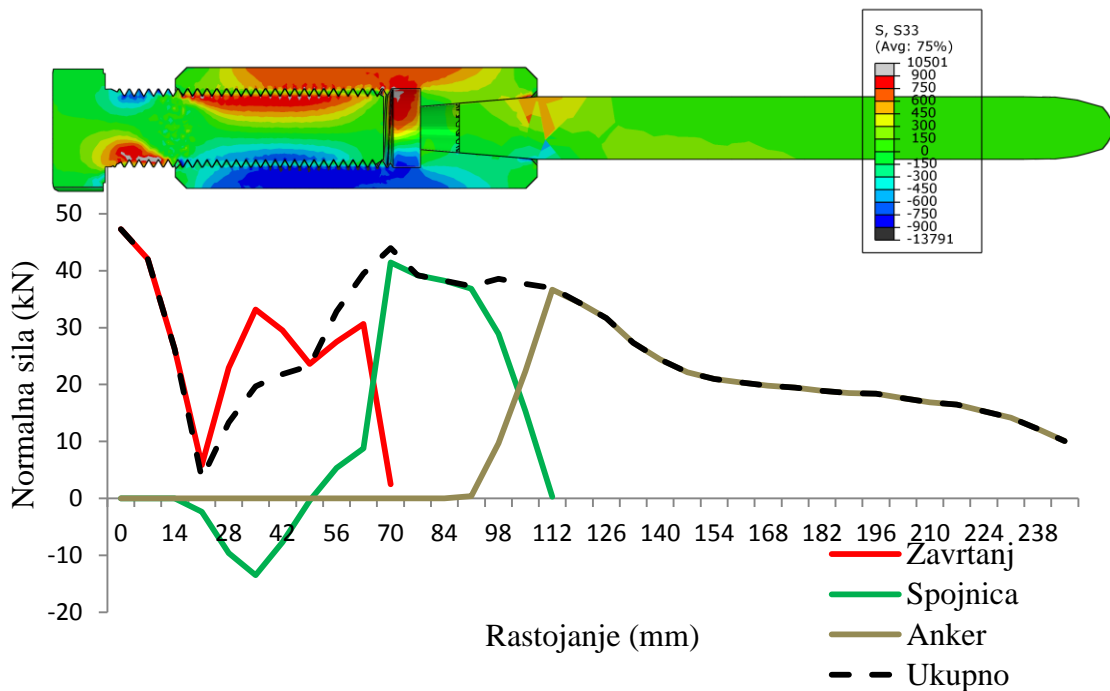
Na dijagramu normalnih napona S33 (u nedeformisnom obliku), prikazanom na slici 6.8, maksimalni naponi u krajnjim vlaknima spojnice, zatezanje na gornjoj strani,

dostižu vrednosti veće od 750 MPa, što predstavlja vrednosti bliske čvrstoći pri zatezanju čelika (tabela 3.6)



**Slika 6.8** Dijagram momenata savijanja u presjecima komponenta konektora

Na slici 6.9 prikazani su dijagrami normalnih sila za zavrtanj, mehaničku spojnica, armaturni anker, kao i ukupna sila u konektoru. Uz ove dijagrame prikazani su i odgovarajući podužni normalni S33 naponi u vertikalnom preseku kroz konektor.

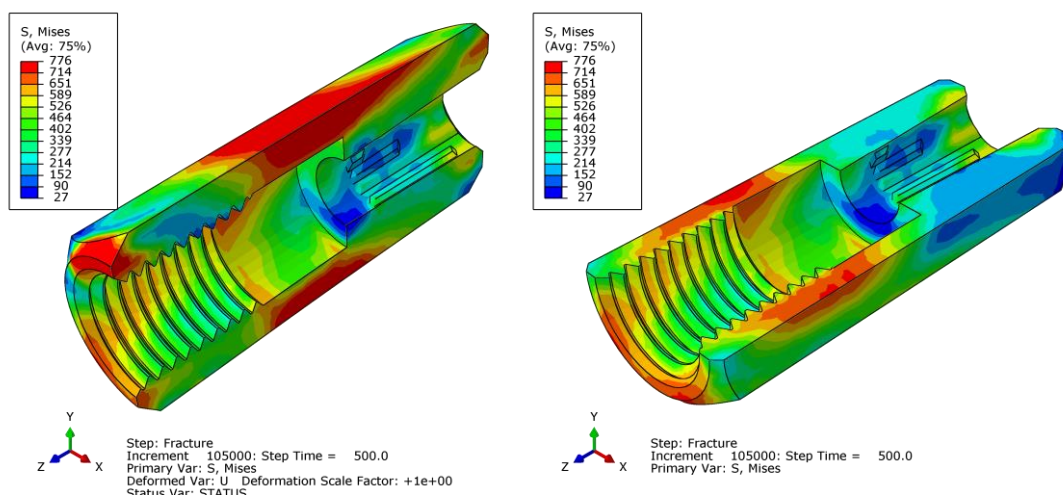


**Slika 6.9** Dijagram normalnih sila u presjecima komponenta konektora

Prvi deo dijagrama normalnih sila, na širini flanše čeličnog profila, predstavlja aksijalnu komponentu vertikalnog opterećenja koja se na ovoj širini prenosi na zavrtnj, a od prevojne tačke raste sila kao efekat lančanice na delu gde poprečno opterećenje predstavlja vertikalni pritisak u betonu ispod mehaničke spojnice. U daljem toku dijagrama prema kraju zavrtnja, sila zatezanja se sa zavrtnja prenosi na spojnicu, zatim sa spojnice na anker, a do kraja ankera se sila sidrenjem prenosi na beton.

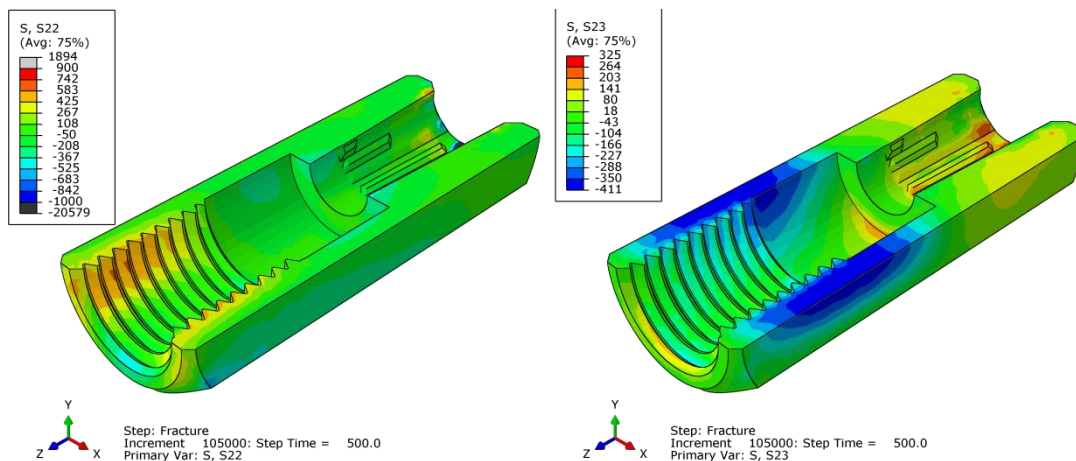
### 6.3.3 Lokalna naprezanja mehaničke spojnice

U poglavlju 3 su prikazana oštećenja jednog broja mehaničkih spojnica nakon eksperimentalnog ispitivanja uzoraka do loma (slike 3.48 do 3.50). Oštećenja su registrovana na 13% ispitivanih spojnica. U tački 6.3.1 ovog poglavlja prikazan je razvoj naprezanja u betonu u okolini smičućeg konektora (slike 6.4 i 6.5), gde je prikazana i objašnjena progresivna plastifikacija i oštećenje betona ispod konektora i pomeranje vertikalnog oslonca u betonu dalje od ivice, što dovodi do savijanja i obrtanja mehaničke spojnice u okviru smičućeg konektora. Dijagrami sila u presecima spojnice su prikazani u prethodnom paragrafu. Na slici 6.10 prikazani su Mizesovi naponi u vertikalnom i horizontalnom preseku spojnice, u trenutku pred lom zavrtnja na smicanje, za spojnicu iz modela FEM\_A.



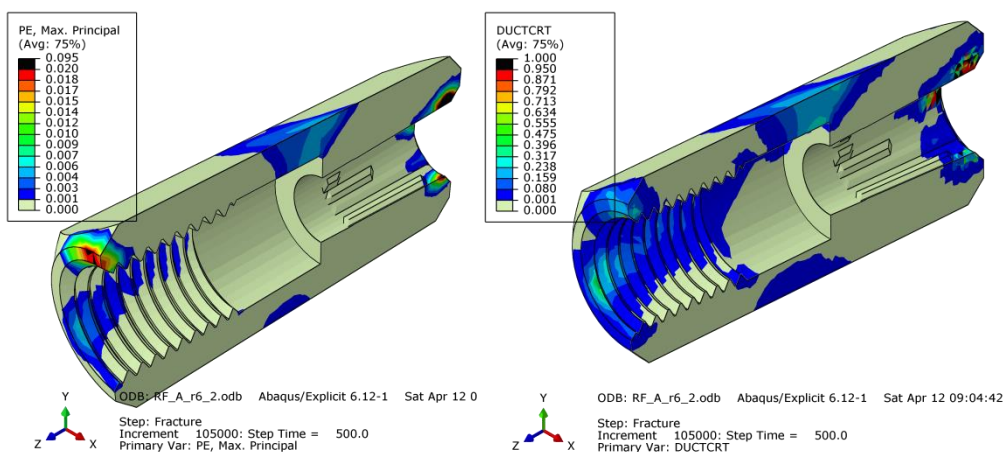
**Slika 6.10** Dijagram Mizesovih napona u spojnici pred lom zavrtnja na smicanje

Na prikazanim dijagramima visoke vrednosti napona na gornjem i donjem vlaknu posledica su normalnih napona (S33, slika 6.9), a naprezanja na oba zida spojnice posledica su kombinacije vertikalnih napona i smičućih napona (S33 i S23, slika 6.11).



**Slika 6.11** Naponi S22 i S23 u zidu spojnice pred lom zavrtnja na smicanje

Maksimalna vrednost Mizesovog napona, na gornjem vlaknu dostiže 761 MPa, a u zidu mehaničke spojnice 720 MPa. Model materijala čelika mehaničke spojnice zadat je dijagramom napon-izduženje na slici 4.10 sa vrednostima granice razvlačenja  $R_{p02}=750$  MPa, čvrstoće  $R_m=770$  MPa i maksimalna dilatacija  $\epsilon_{uz}=8\%$ . Može se, dakle, zaključiti da dolazi do plastifikacije pojedinih zona spojnice, ali ne i do značajnog oštećenja, jer maksimalne plastične dilatacije, kada se isključi lokalitet vrha spojnice kojom se "zaglavljuje" u flanšu čeličnog profila, ne prelaze vrednost od 0.6% (slika 6.12, levo) što je daleko ispod plastične dilatacije koja odgovara nastanku oštećenja, odnosno, lomu materijala. Ovo pokazuje i dijagram promenljive DUCTCRT (Ductile damage initiation criterion), čija vrednost raste sa plastičnom dilatacijom, od nule do maksimalne vrednosti 1.0, koja odgovara nastanku oštećenja (slika 6.12 desno).



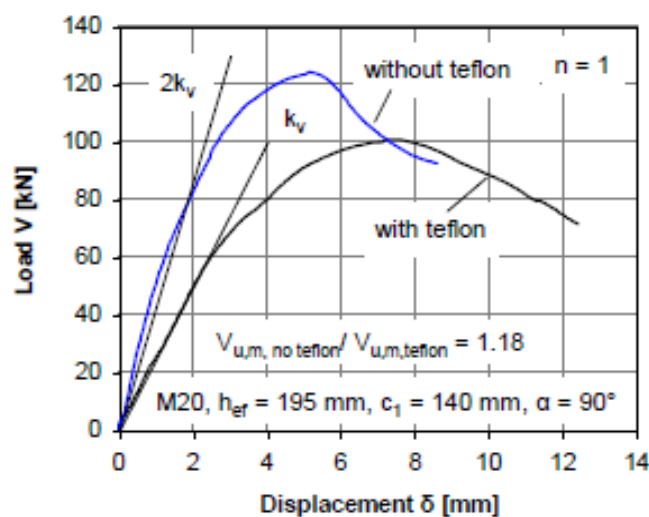
**Slika 6.12** Plastifikacija delova spojnice pred lom zavrtnja na smicanje

Nastanak oštećenja na manjem broju mehaničkih spojnica nakon eksperimentalnog ispitivanja može se objasniti lošijim lokalnim mehaničkim

karakteristikama materijala betona ispod pojedinih spojnica (posledica mogućeg lošeg ugrađivanja ili lokalno drugačijeg granulometrijskog sastava betona), kao i odstupanjem mehaničkih karakteristika materijala čelika spojnica od specificiranih od strane proizvođača. Treba uzeti u obzir i da mehaničke karakteristike čelika mehaničkih spojnica su, fabrički, ispitivane na epruvetama pre urezivanja navoja, koje svakako, u određenoj meri, dovodi do stvaranja zaostalih napona i izmena mehaničkih karakteristika materijala.

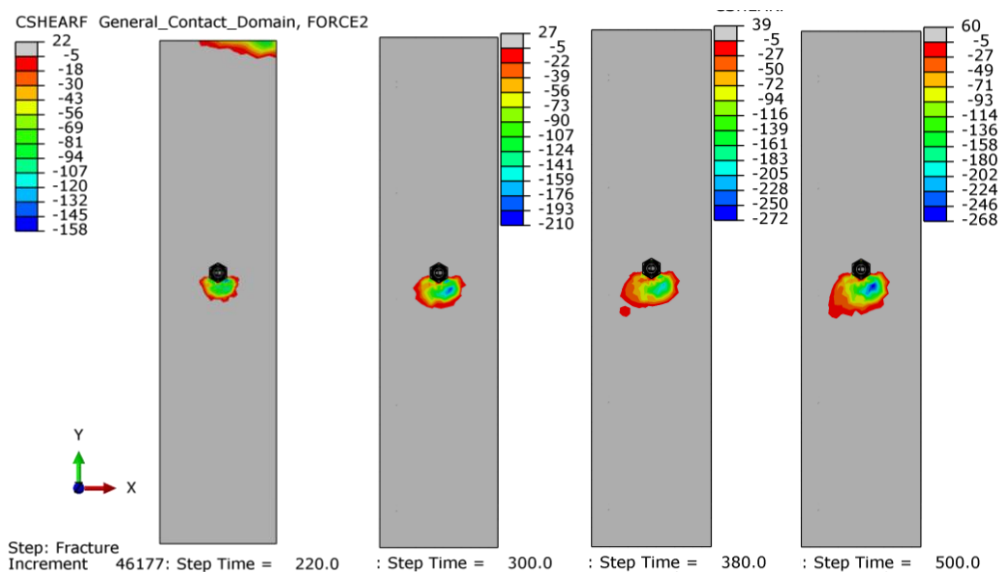
### 6.3.4 Uticaj trenja između flanše i površine betona na nosivost smičućeg spoja

Efekat trenja u okviru smičućeg spoja, između čelične ploče i površine betona je ispitivan u prethodnim istraživanjima [Grosser, 2012]. Upoređivana je nosivost i ponašanje veze bušenog (naknadno ugrađenog) ankera u slučajevima kada je, radi eliminisanje trenja, kontaktna površina između čelika i beton premazana slojem teflona, kao i slučaj kada nema nikakvog premaza. Razlika u merenim vrednostima je prikazana na slici 6.13 na dijagramu sila – vertikalno pomeranje. Dijagram se odnosi na anker M20, dužine 195 mm, opterećen paralelno sa ivicom betona na osnom rastojanju 140mm od ivice. Na dijagramu se vidi da je, uz prisustvo trenja, u posmatranom slučaju, nosivost veća za 18%, početna krutost veća dva puta, a maksimalno pomeranje je manje oko 30%. Prikazano istraživanje se odnosi na naknadno ugrađen anker, dakle na spajanje čeličnog profila i očvrslog betona, kao što je to slučaj i kod testiranih uzoraka u okviru ove teze.



**Slika 6.13** Uticaj trenja na nosivost i pomeranje veze: sa teflonom (crna linija) i bez teflona (plava linija) [Grosser, 2012]

Efekat trenja između čelične flanše i površine armiranobetonske prizme je analiziran na FE modelima u ABAQUS-u preko ukupne kontaktne sile u vertikalnom pravcu (CSHEARF, F22). Razvoj kontaktne sile, date u njutnima, za model FEM\_A, za četiri nivoa spoljašnje sile (slika 6.3) prikazan je na slici 6.14.

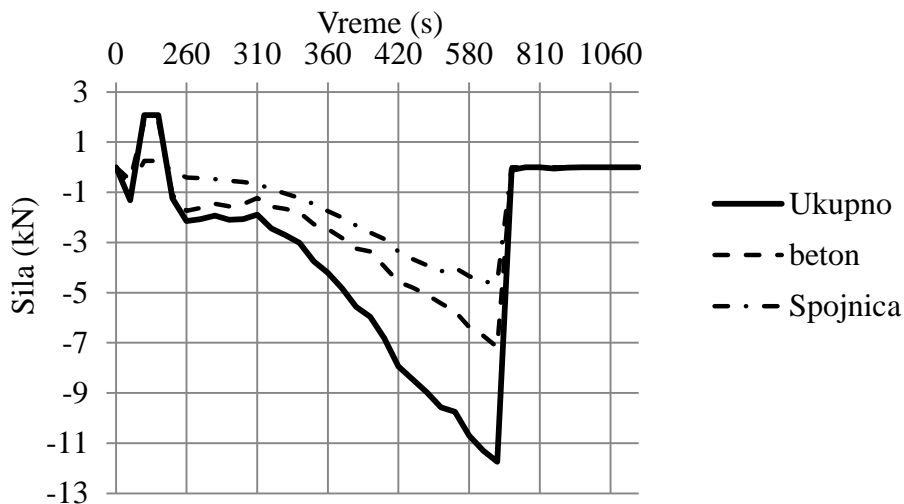


**Slika 6.14** Razvoj sila trenja na kontaktu između čelične flanše i AB prizme (FEM\_A)

Pri nižim spoljnim silama kontakt se ostvaruje na vrhu prizme, izazvan spregom horizontalnih sila koji se javlja usled ekscentričnog položaja spoljne sile u odnosu na težište AB prizme. Naime, sila pritiska se javlja na vrhu prizme, a sila zatezanja delom na konektoru, delom u osloncu na donjoj ivici prizme. Pri prirastu opterećenja i plastifikaciji betona ispod konektora, rastu bočni naponi i pritisak na flanšu. Flanša se odvajaju od ostalih delova površine AB prizme, i trenje se prenosi samo na površini ispod mehaničke spojnice. Dijagram prirasta sile trenja kroz vreme je prikazan na slici 6.14. Sila trenja "na gore" u početnom delu dijagrama posledica je rasterećenja pri cikličnom opterećenju. Nagli pad sila trenja u trenutku 660 sekundi od početka nanošenja opterećenja, odgovara lomu zavrtnja na smicanje.

Na slici 6.15 prikazan je i udeo trenja preko efekta "zaglavlivanja" mehaničke spojnice u čeličnu flanšu u ukupnoj sili trenja. Ovaj efekat je sličan efektu trenja između ubetonirane navrtke i čelične flanše kod konektora sa ubetoniranim zavrtnjevima koje je opisao [Pavlović, 2014].





**Slika 6.15** Razvoj sila trenja na kontaktu između čelične flanše i AB prizme kroz vreme nanošenja opterećenja (FEM\_A)

Efekat trenja je izraženiji kod modela sa manjom čvrstoćom betona pri pritisku, jer je zona pastifikacije betona ispod smičućeg konektora većih dimenzija, pa je i površina bočnih pritisaka na flanšu veća. U tabeli 6.1 su prikazane vrednosti maksimalnih sila trenja  $P_{fr}$  za četiri FE modela koji odgovaraju eksperimentalno ispitivanim uzorcima. Sile u tabeli se odnose na ceo uzorak (četvorostruka vrednost sile iz FE modela). Prikazan je procentni udeo sile trenja  $P_{fr}$  u ukupnoj nosivosti  $P_{ult}$ .

**Tabela 6.1** Udeo sile trenja u ukupnoj nosivosti FE modela

| Model | $P_{fr}$<br>kN | $P_{ult}$<br>kN | $P_{fr}/P_{ult}$<br>% |
|-------|----------------|-----------------|-----------------------|
| FEM_A | 46.96          | 393.6           | 11.93                 |
| FEM_C | 35.52          | 385.9           | 9.20                  |
| FEM_D | 18.40          | 381.7           | 4.82                  |
| FEM_E | 30.20          | 591.4           | 5.11                  |

Treba naglasiti da na modelima FEM\_D i FEM\_E postavljen zazor između površine čelične flanše i betona od 0.5 mm (slika 4.3), pa su i efekti trenja znatno manji. Kod modela bez zazora (FEM\_A i FEM\_C) efekat trenja je značajan, mada nešto manji od 18% koliko je pri ispitivanjima zabeležio [Grosser, 2012] (slika 3.55).

### 6.3.5 Efektivna dužina smičućeg konektora

Nosivost smičućih konektora, za slučajeve dostizanja graničnog stanja nosivosti u betonu, dominantno zavisi od čvrstoće betona pri pritisku, prečnika konektora, kao i



njegove efektivne dužine. Kod čeličnih moždanika sa glavom i ubetoniranih čeličnih zavrtnjeva se najčešće, u naučno istraživačkoj i stručnoj literaturi, umesto termina "efektivna dužina" koristi termin "efektivna visina", zato što se radi o vertikalnim moždanicima u pločama i gredama, i predstavlja rastojanja od čelične flanše do početka glave moždanika. Za naknadno ugrađene (bušene) ankere, efektivna dužina je definisana na slici 2.23 u poglavlju 2. Granična nosivost ankera u blizini ivice betona, opterećenog paralelno sa ivicom, prema [CEN/TS 2, 2009] definisana je izrazom (2.8). Efektivna dužina koja se koristi u ovom izrazu je ograničena uslovom  $l_f \leq 8d_{nom}$ , uz ograničenje za nominalni prečnik  $d_{nom} \leq 60$  mm. Ukoliko je stvarna dužina ankera veća, za proračun granične nosivosti se uzima maksimalna efektivna dužina.

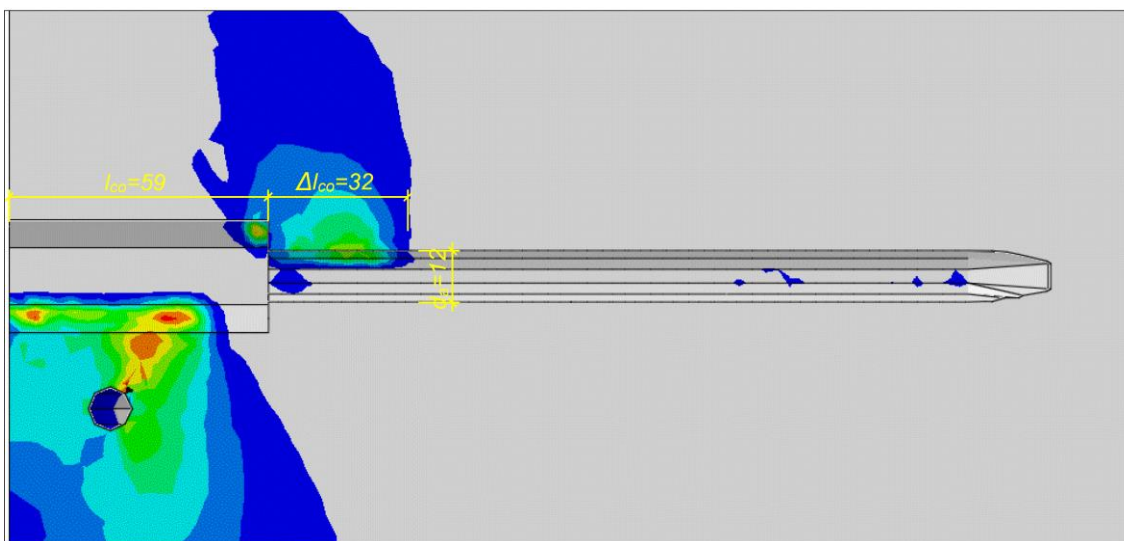
Prema preporukama datim u [CEB-FIP, 2011], maksimalna efektivna dužina za proračun granične nosivosti ankera opterećenih na smicanje paralelno sa ivicom betona ograničena je na  $l_f \leq 12d_{nom}$  za  $d_{nom} \leq 24$  mm, odnosno  $l_f \leq 8d_{nom}$  za  $d_{nom} > 24$  mm. Treba naglasiti da se navedena ograničenja u dužini ankera koja se uzima pri proračunu granične nosivosti pri smicanju paralelno sa ivicom betona odnose na ankere konstantnog poprečnog preseka po dužini ankera. Za ankere sa promenljivim prečnikom efektivna dužina se posebno propisuje na osnovu posebnih ispitivanja za svaki tip pojedinačno.

U prethodnim paragrafima u okviru ovog poglavlja detaljno je razmatran način dostizanja granične nosivosti za smičuće konektore sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom, koji predstavljaju predmet istraživanja u okviru ove disertacije. S obzirom da je veza između konektora i čelične flanše ostvarena pomoću zavrtnja, a ne zavarivanjem, da se konektor sidri u dubinu betona preko armaturnog ankera, a ne glavom, kao i na osnovu oblika polja napona u okolini konektora pri dostizanju granične nosivosti, može se povući jasna analogija između ispitivanih smičućih konektora i naknadno ugrađenih (bušenih) ankera. Osnovna razlika je u tome što smičući konektor ima dva različita prečnika (prečnik mehaničke spojnice i prečnik armaturnog ankera), kao i to da je dužina ovakvog konektora relativno velika, kao posledica dužine sidrenja armaturnog ankera. Kako bi analogija sa naknadno ugrađenim konektorima proširila na proračun granične nosivosti, i primenili u literaturi i normama postojeći izrazi za proračun naknadno ugrađenih ankera na proračun granične nosivosti ispitivanih

smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom, neophodno je utvrditi njihovu efektivnu dužinu.

Na slikama 6.4 i 6.5 prikazan je oblik naponskog dijagrama u betonu u okolini smičućeg konektora kao rezultat numeričkog proračuna maodela FEM\_A. Veoma je sličan oblik ovih dijagrama i za ostale proračunavane modele. Može se zaključiti da se prenošenje spoljašnje sile smicanja preko konektora na beton vrši preko samo jednog dela od ukupne dužine konektora. Dužinu konektora preko koje se prenosi opterećenje na beton, upravno na pravac konektora, čini dužina mehaničke spojnice i jednog dela armaturnog ankera neposredno uz spojnicu. To je upravo ona dužina konektora na kojoj se javljaju transverzalne sile i momenti savijanja, čiji su dijagrami prikazani na slikama 6.7 do 6.9. Normalna sila se, kao efekat sidrenja, javlja celom dužinom ankera.

Na slici 6.16, na dijagramu vertikalnih napona S22 u betonu (rezultat proračuna na FEM\_A), u trenutku pred lom zavrtnja, označena je dužina ankera na kojoj se prenosi opterećenje na beton.



**Slika 6.16** Efektivna dužina smičućeg konektora (FEM\_A)

Dužinu na kojoj se prenosi opterećenje sa konektora na beton, prema slici 6.15, iznosi:

$$l_f = l_{co} + \Delta l_{co} \quad (6.1)$$

gde je:

$l_{co}$  dužina mehaničke spojnice

$\Delta l_{co}$  dužina angažovanja armaturnog ankera.

Ukupna površina preko koje se prenosi naprezanje na beton približno iznosi:

$$A \approx l_{co} \cdot d_{co} + \Delta l_{co} \cdot d_a \quad (6.2)$$

gde je  $d_{co}$  prečnik mehaničke spojnice, a  $d_a$  prečnik armature anker. Za zamenjujući konektor, konstantnog poprečnog preseka, prečnika  $d_{co}$  efektivna dužina je:

$$l_f = A/d_{co} = l_{co} + \Delta l_{co} \cdot d_a/d_{co} \quad (6.3)$$

Dužina angažovanja armaturnog anker u okviru smičućeg konektora  $\Delta l_{co}$  je utvrđena na odgovarajućim dijagramima napona u okolini konektora pred lom zavrtnja na smicanje, za sve proračunate FE modele, i prikazana u tabeli 6.2.

**Tabela 6.2** Parametri za određivanje efektivne dužine konektora (FE modeli uzoraka)

|       | $d_a$ | $f_{cm}$ | $\Delta l_{co}$ |
|-------|-------|----------|-----------------|
|       | mm    | MPa      | mm              |
| FEM_A | 12    | 26.6     | 32              |
| FEM_C | 12    | 37.7     | 25              |
| FEM_D | 12    | 32.6     | 27              |
| FEM_E | 16    | 39.4     | 32              |

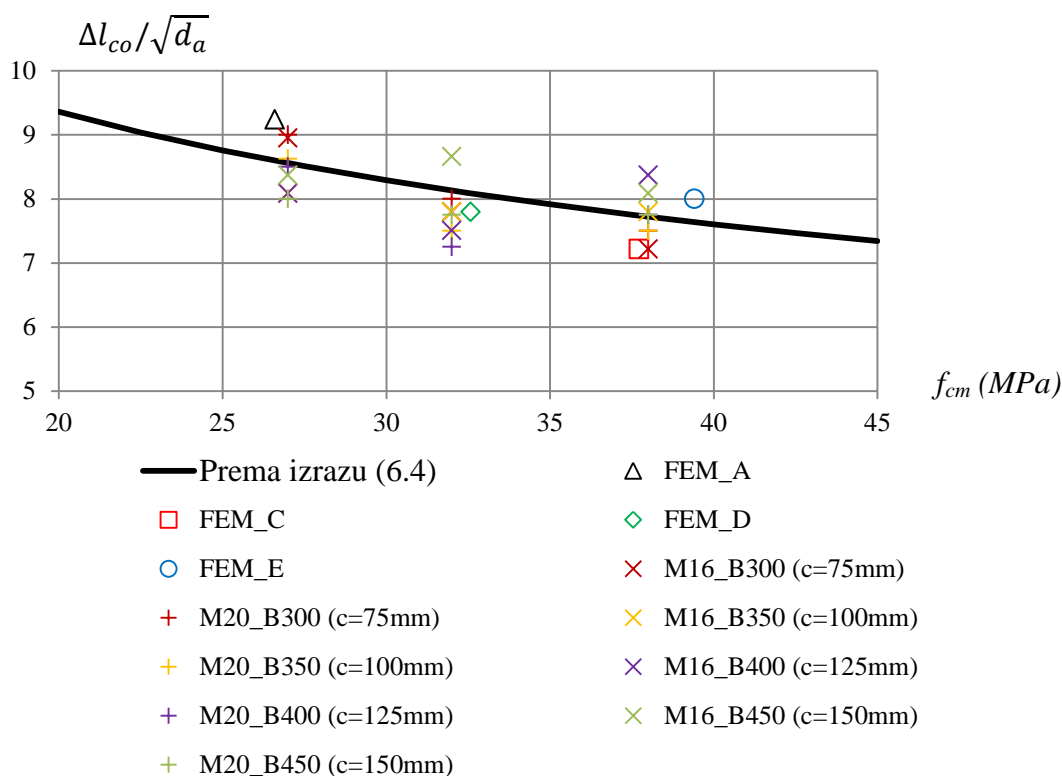
**Tabela 6.3** Parametri za određivanje efektivne dužine konektora (FE modeli parametarske analize)

| Model        | $d_a$ | $f_{cm}$ | $\Delta l_{co}$ | $\Delta l_{co}/d_{co}$ | Model        | $d_a$ | $f_{cm}$ | $\Delta l_{co}$ | $\Delta l_{co}/d_{co}$ |
|--------------|-------|----------|-----------------|------------------------|--------------|-------|----------|-----------------|------------------------|
|              | mm    | MPa      | mm              |                        |              | mm    | MPa      | mm              |                        |
| M16_C27_B300 | 12    | 27       | 31.0            | 8.949                  | M20_C27_B300 | 16    | 27       | 36.0            | 9.000                  |
| M16_C27_B350 | 12    | 27       | 28.0            | 8.083                  | M20_C27_B350 | 16    | 27       | 34.5            | 8.625                  |
| M16_C27_B400 | 12    | 27       | 28.0            | 8.083                  | M20_C27_B400 | 16    | 27       | 34.0            | 8.500                  |
| M16_C27_B450 | 12    | 27       | 29.0            | 8.372                  | M20_C27_B450 | 16    | 27       | 32.0            | 8.000                  |
| M16_C32_B300 | 12    | 32       | 27.0            | 7.794                  | M20_C32_B300 | 16    | 32       | 32.0            | 8.000                  |
| M16_C32_B350 | 12    | 32       | 27.0            | 7.794                  | M20_C32_B350 | 16    | 32       | 30.0            | 7.500                  |
| M16_C32_B400 | 12    | 32       | 26.0            | 7.506                  | M20_C32_B400 | 16    | 32       | 29.0            | 7.250                  |
| M16_C32_B450 | 12    | 32       | 30.0            | 8.660                  | M20_C32_B450 | 16    | 32       | 31.0            | 7.750                  |
| M16_C38_B300 | 12    | 38       | 25.0            | 7.217                  | M20_C38_B300 | 16    | 38       | 30.0            | 7.500                  |
| M16_C38_B350 | 12    | 38       | 27.0            | 7.794                  | M20_C38_B350 | 16    | 38       | 30.0            | 7.500                  |
| M16_C38_B400 | 12    | 38       | 29.0            | 8.372                  | M20_C38_B400 | 16    | 38       | 31.0            | 7.750                  |
| M16_C38_B450 | 12    | 38       | 28.0            | 8.083                  | M20_C38_B450 | 16    | 38       | 31.0            | 7.750                  |

Dužina angažovanja armaturnog anker  $\Delta l_{co}$  proporcionalna je prečniku anker a obrnuto proporcionalna čvrstoći betona pri pritisku. Prema sprovedenoj analizi, ova zavisnost se može opisati izrazom (6.4).

$$\Delta l_{co} = \frac{23}{f_{cm}^{0.3}} \cdot \sqrt{d_a} \quad (6.4)$$

Na dijagramu na slici 6.17 prikazana je zavisnost relativne dužine angažovanja armaturnog ankera  $\Delta l_{co}/\sqrt{d_a}$  od čvrstoće betona pri pritisku  $f_{cm}$ . Punom linijom su prikazane vrednosti dobijene prema predloženom izrazu (6.4), a tačkama su prikazane vrednosti dobijene proračunom oblika polja napona na FE modelima koji odgovaraju uzorcima, kao i FE modelima iz parametarske analize (tabele 6.2 i 6.3).



**Slika 6.17** Relativna dužina angažovanja armaturnog ankera

Iz izraza (6.3) i (6.4) sledi konačna zavisnost kojom se definiše efektivna dužina zamenjujućeg smičućeg konektora konstantnog prečnika  $d_{co}$  (6.5).

$$l_f = l_{co} + \frac{23}{f_{cm}^{0.3}} \cdot \frac{d_a^{1.5}}{d_{co}} \quad (6.5)$$

#### 6.4 Proračun granične nosivosti smičućeg konektora

U okviru paragrafa 6.2 ovog poglavlja razmatran je način loma smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom. Na osnovu sprovedene analize, kao i rezultata parametarske numeričke analize na FE modelima, koja je prikazana u poglavlju 5, zaključeno je da se granična nosivost ispitivanih konektora može uporediti sa

odgovarajućom nosivošću naknadno ugrađenih ankera velike dužine. Za ispitivanu dispoziciju smičuće veze, sledi da je očekivani način loma konektora lom na smicanje po čeliku i lom po betonu usled blizine ivice.

#### 6.4.1 Granična nosivost smičućeg konektora na smicanje po čeliku

Granična nosivost naknadno ugrađenih ankera na smicanje po čeliku generalno treba da bude propisana od strane proizvođača i potvrđena odgovarajućim atestom [CEB-FIP, 2011]. Kao alternativa, kada nosivost nije propisana od proizvođača, srednja granična nosivost ankera na smicanje po čeliku definisana je izrazom:

$$V_{R,S} = \alpha_V \cdot A_s \cdot f_u \quad (6.6)$$

gde je:

$A_s$  ispitni presek ankera,

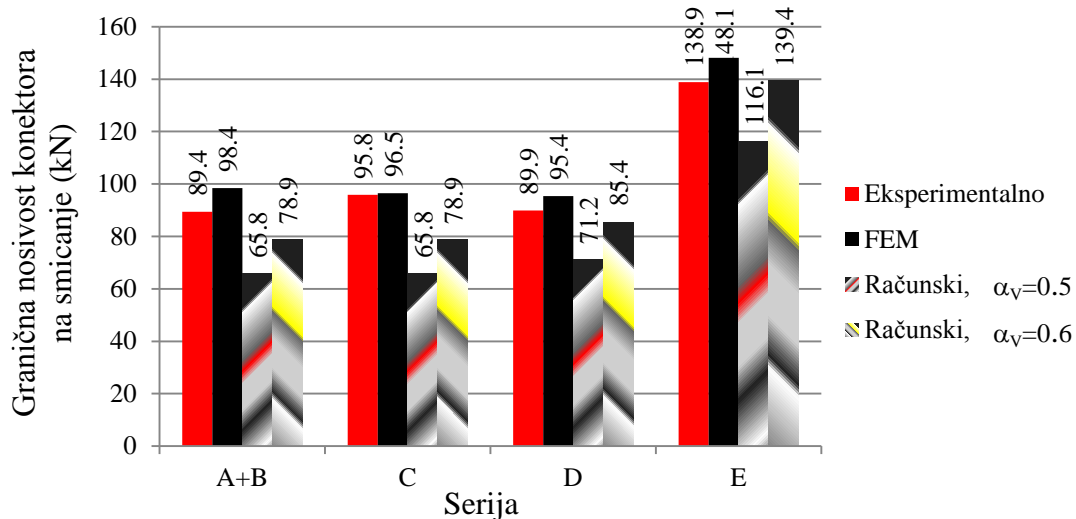
$f_u$  srednja vrednost čvrstoće čelika ankera pri zatezanju,

$\alpha_V = 0.6$  za  $f_u < 500$  MPa ,

$= 0.5$  za  $500 \text{ MPa} \leq f_u \leq 1000$  MPa.

Izraz (6.6) u skladu je sa izrazom kojim graničnu nosivost zavrtnjeva u čeličnim vezama na smicanje propisuje [EC3 Part 1-8, 2005], stim što je vrednost koeficijenta  $\alpha_V = 0.6$  za klase čelika čvrstoće 4.6, 5.6 i 8.8, odnosno  $\alpha_V = 0.5$  za klase čvrstoće 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9.

Na slici 6.18 prikazano je upoređenje računске granične nosivosti smičućeg konektora na smicanje prema izrazu 6.6, merenih vrednosti maksimalne sile u konektoru pri eksperimentlnom ispitivanju uzoraka i odgovarajuće vrednosti dobijene numeričkim proračunom na FE modelima. Pri proračunu računске granične nosivosti zavrtnjeva upotrebljene su vrednosti čvrstoće pri zatezanju dobijene merenjem srednje granične čvrstoće pri zatezanju čelika zavrtnjeva pri ispitivanju odgovarajućih epruveta (videti tabelu 3.3, poglavlje 3). Ispitivani zavrtnjevi, prema merenjima na epruvetama (tabela 3.3), su po svojim karakteristikama između klase 8.8 i klase 10.9. Računska granična nosivost je prikazana za dve vrednosti koeficijenta  $\alpha_V$ : 0.5 i 0.6.



**Slika 6.18** Granična nosivost konektora na smicanje

Sa dijagrama na slici 6.18 se vidi da se bolja poklapanja merenih i vrednosti proračunatih na FE modelima sa računskim prema izrazu (6.6) za vrednost koeficijenta  $\alpha_v=0.6$ .

Kao što je pokazano u poglavlju 3, prilikom analize rezultata eksperimentalnog ispitivanja uzoraka, kao i u ovom poglavlju, pri analizi naprezanja smičućeg konektora i okolnog betona, u zavrtnju se u trenutku loma na javlja čisto smicanje, već, usled savijanja i aksijalne sile, složeno naprezanje, odakle sledi da je eksperimentalno izmerena i proračunom na FE modelima određena granična nosivost na smicanje nešto veća od računске granične nosivosti zavrtnja na smicanje.

Na osnovu prethodne analize sledi da je srednja granična nosivost smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom na smicanje po čeliku jednaka graničnoj nosivosti zavrtnja na smicanje, i data je izrazom:

$$V_{R,S} = 0.6 \cdot A_s \cdot f_u \quad (6.7)$$

gde je:

$A_s$  ispitni presek zavrtnja,

$f_u$  srednja vrednost čvrstoće čelika zavrtnja pri zatezanju.

Karakteristična vrednost granične nosivosti smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom na smicanje po čeliku iznosi:

$$V_{Rk,S} = 0.6 \cdot A_s \cdot f_{uk} \quad (6.8)$$

gde je:

$f_{uk}$  karakteristična vrednost čvrstoće čelika zavrtnja pri zatezanju.

Pri proveru granične nosivosti smičućeg konektora za zadata proračunsku smičuću silu  $V_{Ed}$  potrebno je dokazati da je zadovoljen uslov dat izrazom (6.9).

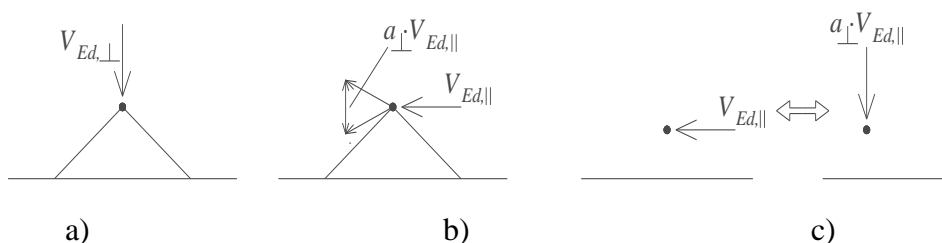
$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} = V_{Rk,s}/\gamma_{Ms} \quad (6.9)$$

gde je  $\gamma_{Ms}$  koeficijent sigurnosti za materijal čelika zavrtnja. Preporučena vrednost je  $\gamma_{Ms}=1.15$  [EC2, 2004].

#### 6.4.2 Granična nosivost smičućeg konektora u blizini ivice betona

Granična nosivost ankera u blizini ivice betona, opterećenih paralelno sa ivicom je, kao predmet istraživanja, sve više zastupljena u naučnoistraživačkoj praksi poslednjih godina u svetu. Pregled dosadašnjih rezultata ovih istraživanja je prikazan u paragrafu 2.4.1 i 2.4.2 u poglavlju 2. U tabeli 2.1 prikazani su izrazi za proračun granične nosivosti ankera u blizini ivice, opterećenih paralelno sa ivicom, koji su predloženi kao rezultat različitih istraživanja.

[CEN/TS 2, 2009] propisuje karakterističnu nosivost ankera u blizini ivice, opterećenih paralelno sa ivicom, preko izraza (2.8) do (2.16), na osnovu modela naprezanja betona na mestu ankera u blizini ivice koji je prikazan na slici 6.19 [CEB-FIP, 2011]. Prikazani model podrazumeva da se nosivost ankera opterećenih paralelno sa ivicom (slika 6.18 b) određuje preko odgovarajuće nosivosti upravno na ivicu (slika 6.18 a). Sile cepanja koje se javljaju ispred ankera opterećenog paralelno sa ivicom silom  $V_{Ed,||}$ , iniciraju lom betona u blizini ivice po obliku sličan onom koji se javlja pri delovanju sile upravno na ivicu. Prema ovom modelu, ove sile cepanja se mogu predstaviti virtuelnom silom  $\alpha_{\perp} \cdot V_{Ed,||}$  upravnom na ivicu (slika 6.18 c), i proračun se dalje sprovodi kao za anker u blizini ivice opterećen na smicanje upravno na ivicu.



**Slika 6.19** Model loma ankera u blizini ivice opterećenog paralelno i upravno sa ivicom

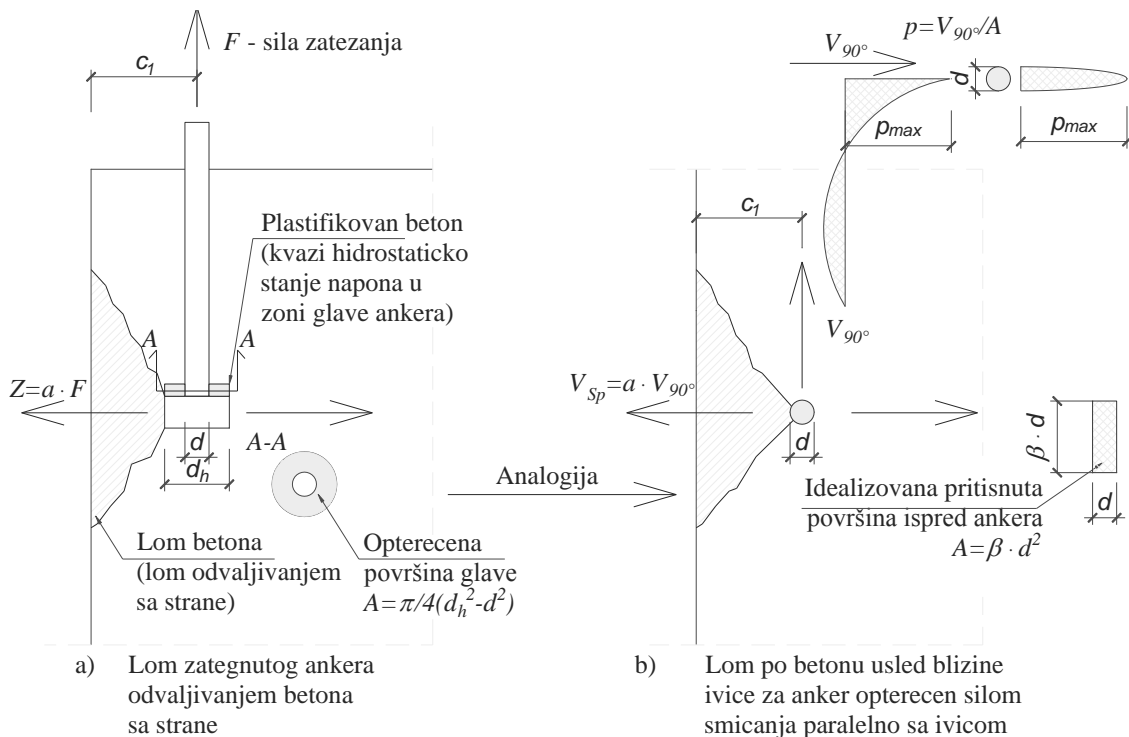
Koeficijent  $\alpha_{\perp}$  je određen izrazom:

$$\alpha_{\perp} = 1/\psi_{90^{\circ},V} \quad (6.10)$$

gde se  $\psi_{90^{\circ},V}$  može odrediti iz opšeg izraza (2.15) za delovanje sile pod proizvoljnim uglom. Za ugao  $\alpha_V = 90^{\circ}$  sledi vrednost  $\psi_{90^{\circ},V} = 1.58$ , odnosno  $\alpha_{\perp} = 0.63$ .

[Grosser, 2012] je izvršio opsežna eksperimentalna istraživanja na velikom broju uzoraka, kao i odgovarajuću teorijsku i numeričke analizu granične nosivosti ankera u blizini ivice betona. Najvažniji rezultati ovog istraživanja, u vezi sa ankerima opterećenim paralelno sa ivicom, prikazani su u poglavlju 2. Jedan od rezultata pomenutog istraživanja, koji će ovde biti detaljnije razmotren, jeste predlog novog modela naprezanja betona u okolini ankera u blizini ivice, opterećenog silom smicanja paralelno sa ivicom.

Novi model je [Grosser, 2012] izveo iz analogije nastanka loma betona odvaljivanjem sa strane ("blow out failure") zategnutih ankera sa glavom u blizini ivice (slika 6.20). Kao što je odvaljivanje posledica prostornog kvazi hidrostatičkog naponskog stanja na gornjoj ivici glave zategnutog ankera, tako se i za lom betona usled blizine ivice, pri dejstvu smičuće sile paralelne sa ivicom, može smatrati da je izazvan lokalnim pritiskom  $p$  u betonu ispred ankera. U slučaju ankera opterećenog na smicanje, veličina pritiska  $p$  zavisi od krutosti ankera koja diktira veličinu pritisnute idealizovane pritisnute površine  $A = \beta \cdot d^2$ .



**Slika 6.20** Novi predloženi model loma ankera u blizini ivice opterećenog paralelno sa ivicom, [Grosser, 2012]



Prema rezultatima ispitivanja [Grosser, 2012] zaključeno je da se odnos između sile koja, delujući upravno na ivicu, dovodi do cepanja betona i sile koja deluje na anker paralelno sa ivicom može izraziti kao:

$$\frac{V_{Sp}}{V_{90^\circ}} = \alpha = k \cdot \frac{p}{\sqrt{f_{cc,200}}} \quad (6.11)$$

gde je:

$$p = V_{90^\circ}/A$$

$$A = \beta \cdot d^2$$

$d$  spoljni prečnik ankera,

$k$  konstanta,

$f_{cc,200}$  srednja čvrstoća na pritisak betona za kocku stranice 200 mm

Sledi da je:

$$V_{90^\circ} = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \beta \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{cc,200}} \cdot V_{Sp}} \quad (6.12)$$

Prethodna istraživanja ankera u blizini ivice, opterećenih upravno na ivicu, pokazuju da je sila  $V_{Sp}$  proporcionalna korenu iz čvrstoće pri pritisku i  $c_1^{4/3}$ , gde je  $c_1$  rastojanje ankera od ivice. Uticaj krutosti ankera opisan je faktorom  $\psi_{1,V} = \beta^{0.5}$ , i prema eksperimentalnim i numeričkim istraživanjima koja je [Grosser, 2012] sproveo, sledi da je :

$$\psi_{1,V} = (l_f/12d)^{0.3} \quad (6.13)$$

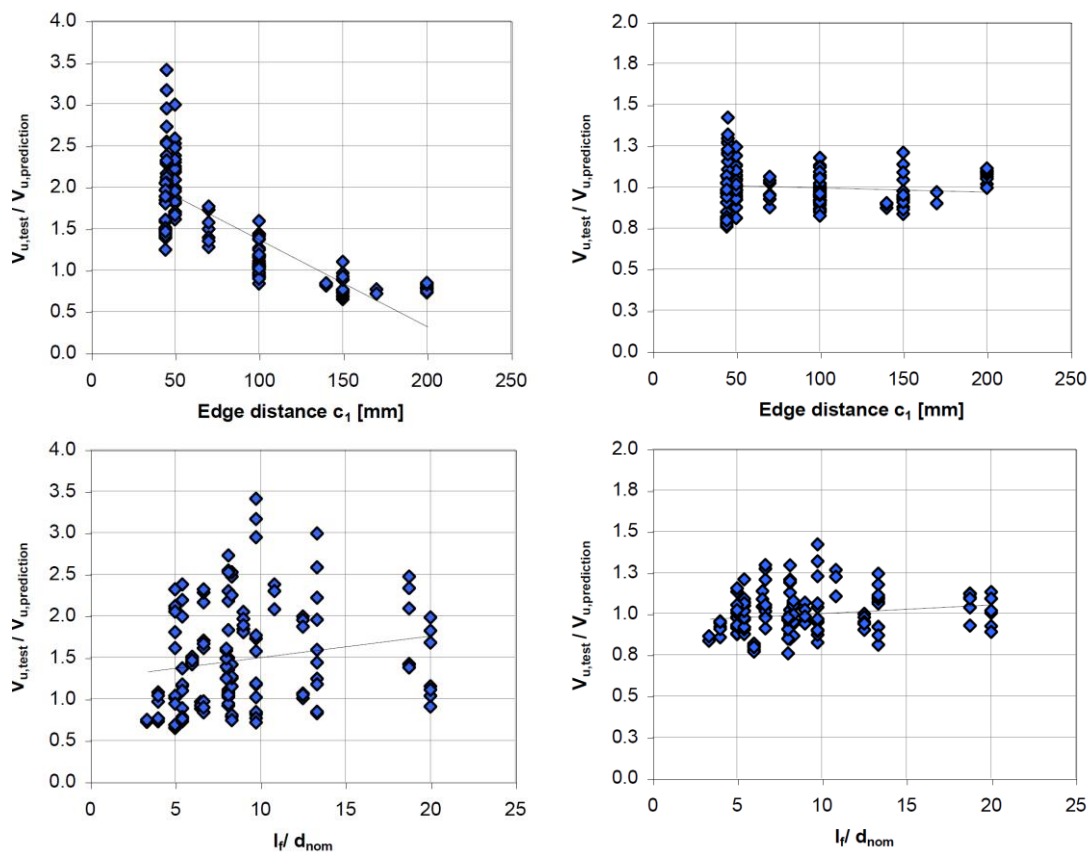
gde je:

$l_f$  efektivna dužina ankera.

Uz eksperimentalno određenu vrednost  $(1/k)^{0.5} = 43$ , sledi konačni izraz za graničnu nosivost ankera u blizini ivice betona, opterećenih na smicanje paralelno sa ivicom (6.14) prema [Grosser, 2012]:

$$V_{uc,90^\circ} = 43 \cdot c_1^{2/3} \cdot \sqrt{f_{cc,200}} \cdot d \cdot (l_f/12d)^{0.3} \quad (6.14)$$

Na slici 6.21 prikazano je upoređenje eksperimentanih i rezultata dobijenih analitički prema novom modelu i prema [CEN/TS 2, 2009] koje je prezentovao [Grosser, 2012].



a) prema [CEN/TS 2, 2009]

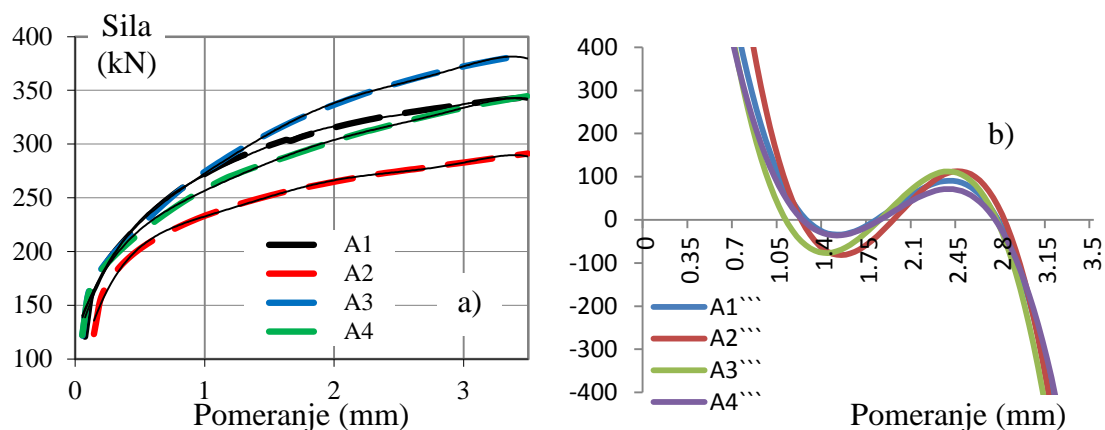
b) novi model [Grosser, 2012]

**Slika 6.21** Upoređenje novog modela loma ankera u blizini ivce opterećenog paralelno sa ivicom [Grosser, 2012] sa postojećim standardom

Prikazane su vrednosti koje predstavljaju odnos merenih i analitičkih vrednosti za graničnu nosivost ankera u blizini ivce opterećenih paralelno sa ivicom ( $V_{u,test}/V_{u,prediction}$ ), za različite vrednosti parametra  $c_1$  (rastojanje ankera od ivice) i  $l/d$  (odnos efektivne dužine i prečnika ankera). Sa slike se jasno vidi da novi model daje mnogo bolja slaganja sa rezultatima dobijenim eksperimentalnim ispitivanjima. U radu koji je prezentovao [Grosser, 2012] može se videti da je sličan rezultat poređenja novog modela sa izrazima za nosivost ankera u blizini ivce opterećenih paralelno sa ivicom prema [CEB-FIP, 2011] i [ACI-318-08 (2008)]. Upoređivani izrazi prezentovi su u tabeli 2.1 u drugom poglavlju ovog rada.

U narednom delu ovog poglavlja analizirana je mogućnost primene izraza (6.14) za proračun granične nosivosti smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom po betonu usled blizine ivice, u sličaju kada smičuća sila deluje paralelno sa ivicom.

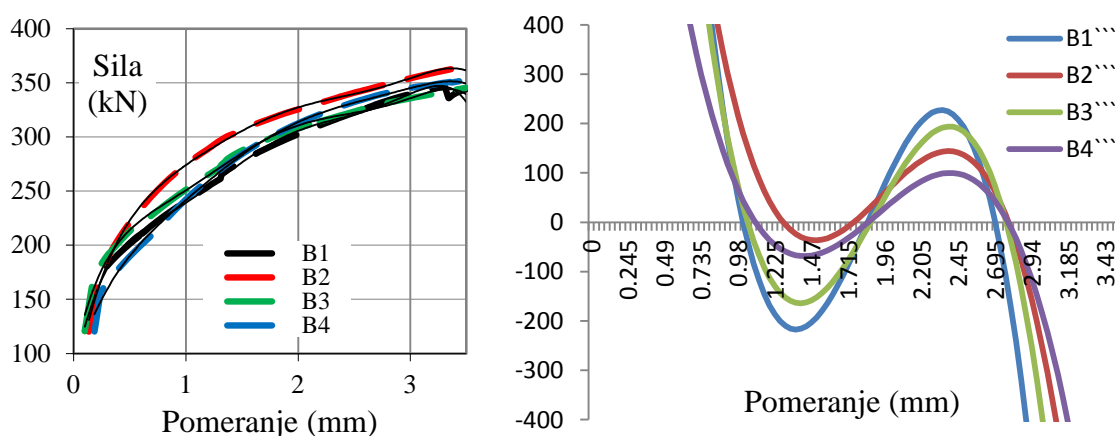
U poglavlju 3 ovog rada, gde su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja, na slici 3.52 je ukazano na zonu pada krutosti na dijagramu sila vertikalno pomeranje kao posledice loma betona usled blizine ivice. U cilju utvrđivanja sille pri kojoj dolazi do pada krutosti, eksperimentalne krive (isprekidane linije na slici 6.22a) su interpretirane trend linijama u obliku polinima šestog stepena (pune tanke linije na slici 6.22a).



**Slika 6.22** Određivanje mesta promene krutosti na krivama sila – vertikalno pomeranje za uzorke serije A

Mestu na krivama sila – vertikalno pomeranje gde se javlja pad krutosti odgovara najbrža promena nagiba tangente na krivu, određena položajem nule trećeg izvoda odgovarajućih trend linija. Krive trećeg izvoda trend linija koje odgovaraju eksperimentalnim krivama sila - vertikalno pomeranje prikazane su na slici 6.22b.

Isti postupak je sproveden za rezultate ispitivanja uzoraka serije B, što je prikazano na slici 6.23.



**Slika 6.23** Određivanje mesta promene krutosti na krivama sila – vertikalno pomeranje za uzorke serije B

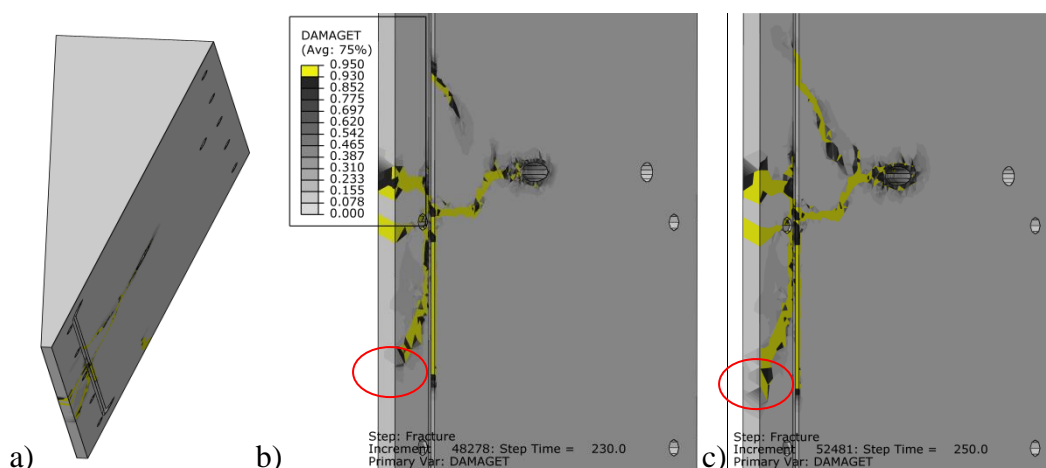
Najmanja vrednost pomeranja na mestu nule trećeg izvoda funkcije trend linija eksperimentalnih krivih odgovara sili loma usled blizine ivice  $V_{uc,90^\circ, test}$ . Ova pomeranja i odgovarajuće sile su prikazane u tabeli 6.4 za uzorke serije A i B.

**Tabela 6.4** Pomeranja i sile na mestu promene krutosti dijagrama sila - pomeranje

| Uzorak            | $\delta$ | $V_{uc,90^\circ, test}$ | Uzorak | $\delta$ | $V_{uc,90^\circ, test}$ |
|-------------------|----------|-------------------------|--------|----------|-------------------------|
|                   | mm       | kN                      |        | mm       | kN                      |
| A1                | 1.27     | 257.50                  | B1     | 1.01     | 248.8                   |
| A2                | 1.22     | 242.0                   | B2     | 1.28     | 295.5                   |
| A3                | 1.10     | 282.0                   | B3     | 1.04     | 254.5                   |
| A4                | 1.24     | 271.5                   | B4     | 1.10     | 251.4                   |
| Srednja vrednost  |          | 263.3                   |        |          | 262.6                   |
| Za jedan konektor |          | 65.8                    |        |          | 65.6                    |

U okviru numeričke analize na FE modelima u programu ABAQUS (videti poglavlje 4) formiran je numerički model FEM\_A koji odgovara eksperimentalno ispitivanim uzorcima serija A i B. U okviru analize nosivosti smičućih konektora u pomenutom modelu pri lomu betona usled blizine ivice, razmatrani su dijagrami promenljive DAMAGET koja predstavlja parametar oštećenja betona pri zatezanju, i kao što je u poglavlju 4 objašnjeno, vrednost ovog parametra se kreće od nule (početak oštećenja) do jedinice (potpuno oštećenje). U poglavlju 4, na slikama 4.28 i 4.29 prikazano je poređenje dijagrama promenljive DAMAGET na FE modelu i oštećenja betona u vidu kosih pukotina na uzorku serije B nakon eksperimentalnog ispitivanja. Pukotine u betonu se najpre razvijaju na površini prizme ispod smičućeg konektora, a zatim, pri daljem prirastu opterećenja, propagiraju u dubinu zaštitnog sloja prema armaturnom košu, dok ne dođe do odlamanja dela zaštitnog sloja na ivici, kao što je prikazano na primeru loma uzorka B2, na slici 3.35, u poglavlju 3. Za kriterijum koji, na numeričkom FE modelu, definiše trenutak nastanka loma po betonu usled blizine ivice je usvojeno da zona punog oštećenja betona pri zatezanju, na granici zaštitnog sloja i dela preseka obuhvaćenog armaturom, propagira kroz ceo zaštitni sloj i dosegne ivicu betona. Ovakav razvoj oštećenja moguće je pratiti na kosom vertikalnom preseku kroz AB prizmu modela koji prolazi kroz vertikalnu šipku armature u uglu preseka (slika 6.24a). Na slici 6.24 prikazan je trenutak neposredno pre (b) i u trenutku loma (c). Trenutak vremena kada lom nastaje, meren od početka druge faze opterećenja

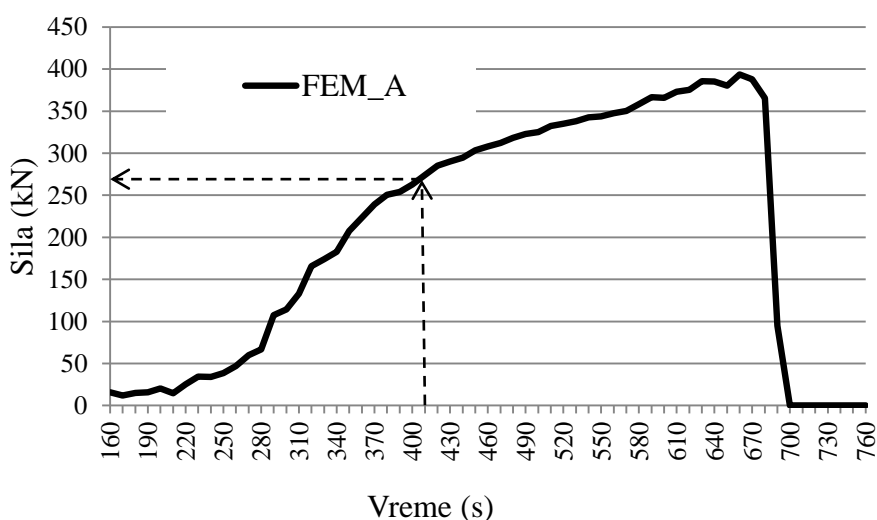
(opterećenje do loma) iznosi 250 s, odnosno 410 s od početka celog procesa opterećivanja uzorka (videti paragraf 4.5 u poglavlju 4)



**Slika 6.24** Nastanak loma po betonu usled blizine ivice na modelu FEM\_A

Sa dijagrama koji predstavlja zapis nanošenja opterećena sila – vreme prikazanog na slici 6.25 za numerički model FEM\_A se može očitati sila koja odgovara trenutku vremena 410 s.

Ova sila, koja se odnosi na ceo model sa četiri konektora, iznosi 274.2 kN. Sila koja predstavlja graničnu nosivost konektora po betonu usled blizine ivice, određena iz numeričkog FE modela, iznosi  $V_{cu,90^{\circ},FEM} = 274.2/4 = 68.55$  kN.



**Slika 6.25** Prirast sile u vremenu za model FEM\_A

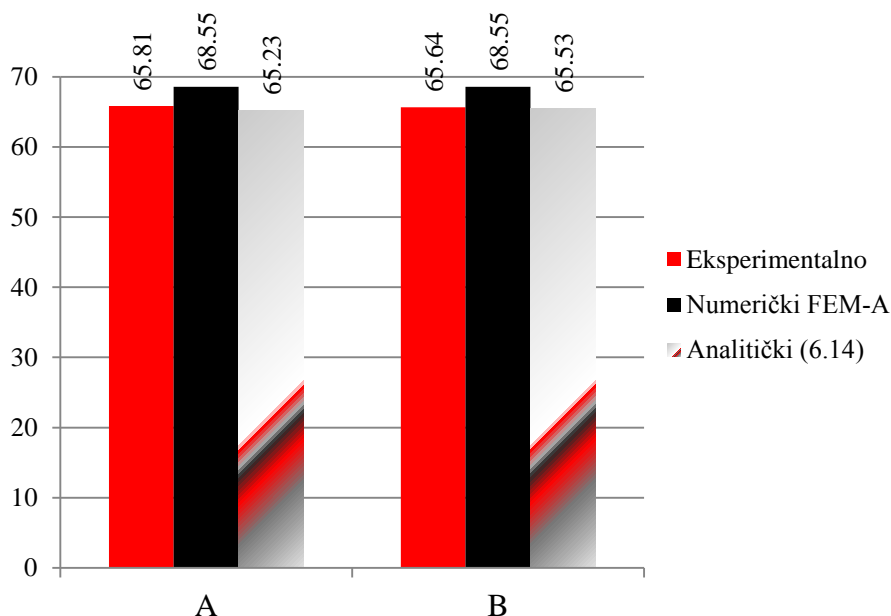
U skladu sa postupkom koji je definisan u okviru ovog rada u paragrafu 6.3.5 ovog poglavlja, određena je efektivna dužina smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom preko izraza (6.5) za uzorke serije A i B, i prikazana u tabeli 6.5. Na osnovu

tako određenih efektivnih dužina, i ostalih geometrijskih karakteristika elemenata konektora prikazanih u istoj tabeli, primenom izraza (6.14) izračunata je srednja granična nosivost smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom po betonu usled blizine ivice  $V_{uc,90°,cal}$ .

**Tabela 6.5** Analitički određena nosivost konektora po betonu usled blizine ivice

| Uzorak | $c_l$ | $d_{co}$ | $d_a$ | $f_{cm}$ | $l_{co}$ | $\Delta l_{co}$ | $l_f$ | $V_{uc,90°,cal}$ |
|--------|-------|----------|-------|----------|----------|-----------------|-------|------------------|
|        | mm    | Mm       | mm    | MPa      | mm       | mm              | mm    | kN               |
| A      | 75    | 22       | 12    | 26.6     | 59.0     | 16.24           | 75.24 | 65.23            |
| B      | 75    | 22       | 12    | 26.9     | 59.0     | 16.19           | 75.19 | 65.53            |

Konačno, na dijagramu na slici 6.26 je izvršeno poređenje srednjih graničnih nosivosti smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom po betonu usled blizine ivice dobijenih eksperimentalnim ispitivanjem, numeričkim modeliranjem i analitički, na osnovu izraza (6.14).



**Slika 6.26** Poređenje nosivosti smičućih konektora usled blizine ivice

Na dijagramu na slici 6.26 se može videti odlično poklapanje eksperimentalnih rezultata, rezultata dobijenim numeričkom analizom i vrednosti izračunate korišćenem izraza (6.14), na osnovu efektivne dužine konektora prema (6.5).

Korišćenjem kriterijuma koji je definisan na slici 6.24, određene su sile loma po betonu usled blizine ivice  $V_{cu,90°,FEM}$  za sve FE modele parametarske analize razmatrane u poglavlju 5, i prikazane u tabeli 6.6. Kod nekih od FE modela nije utvrđen nastanak

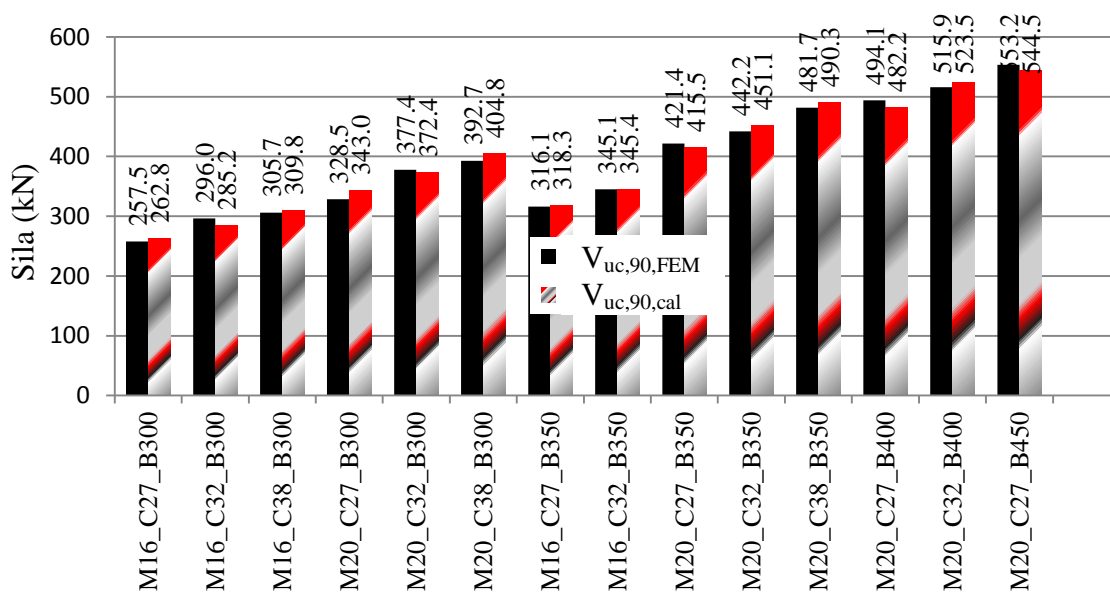
loma po betonu usled blizine ivice (bez vrednosti za  $V_{cu,90^{\circ},FEM}$  u tabeli 6.6). Posebno su u tabeli 6.6, sivim poljima istaknute vrednosti sila  $V_{cu,90^{\circ},FEM}$  za one FE modele kod kojih važi uslov  $V_{cu,90^{\circ},FEM} > 0.9P_{ult}$ , a to su slučajavei kada je lom po betonu usled blizine ivice u graničnoj zoni dijagrama sila - vertikalno pomeranje, kada su vrednosti  $V_{cu,90^{\circ},FEM}$  bliske ili praktično koincidiraju sa  $P_{ult}$ , i kada se ne može jasno razdvojiti pojava loma po betonu usled blizine ivice od pojave loma konektora usled smicanja u zavrtnju. Za sve numeričke FE modele razmatrane u parametarskoj analizi su utvrđene dužina angažovanja armaturnog ankera, u skladu sa slikom 6.15, i na osnovu izraza (6.5) izračunata efektivna dužina zamenjujućeg smičućeg konektora konstantnog prečnika  $d_{co}$ .

**Tabela 6.6** Numerički i analitički određena nosivost konektora usled blizine ivice

| Model        | $c$ | $P_{ult}$ | $V_{uc,90^{\circ},FEM}$ | $V_{uc,90^{\circ},cal}$ | $V_{uc,90^{\circ},cal}/P_{ult}$ |
|--------------|-----|-----------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|
|              | mm  | kN        | kN                      | kN                      | %                               |
| M16_C27_B300 | 75  | 409.0     | 257.5                   | 262.8                   | 64.3                            |
| M16_C27_B350 | 100 | 406.4     | 316.1                   | 318.3                   | 78.3                            |
| M16_C27_B400 | 125 | 399.4     | 371.1                   | 369.4                   | 92.5                            |
| M16_C27_B450 | 150 | 384.4     | -                       | <b>417.1</b>            | 108.5                           |
| M16_C32_B300 | 75  | 402.8     | 296.0                   | 285.2                   | 70.8                            |
| M16_C32_B350 | 100 | 396.2     | 345.1                   | 345.4                   | 87.2                            |
| M16_C32_B400 | 125 | 378.4     | -                       | <b>435.5</b>            | 115.1                           |
| M16_C32_B450 | 150 | 379.2     | -                       | <b>491.7</b>            | 129.7                           |
| M16_C38_B300 | 75  | 398.2     | 305.7                   | 309.8                   | 77.8                            |
| M16_C38_B350 | 100 | 382.3     | 370.0                   | 375.3                   | 98.2                            |
| M16_C38_B400 | 125 | 373.7     | -                       | <b>435.5</b>            | 116.5                           |
| M16_C38_B450 | 150 | 375.6     | -                       | <b>491.7</b>            | 130.9                           |
| M20_C27_B300 | 75  | 690.4     | 363.2                   | 343.0                   | 49.7                            |
| M20_C27_B350 | 100 | 660.5     | 421.4                   | 415.5                   | 62.9                            |
| M20_C27_B400 | 125 | 638.3     | 494.1                   | 482.2                   | 75.5                            |
| M20_C27_B450 | 150 | 621.4     | 553.2                   | 544.5                   | 87.6                            |
| M20_C32_B300 | 75  | 665.1     | 377.4                   | 372.4                   | 56.0                            |
| M20_C32_B350 | 100 | 640.2     | 442.2                   | 451.1                   | 70.5                            |
| M20_C32_B400 | 125 | 617.6     | 515.9                   | 523.5                   | 84.8                            |
| M20_C32_B450 | 150 | 607.0     | 590.3                   | 591.2                   | 97.4                            |
| M20_C38_B300 | 75  | 648.8     | 392.7                   | 404.8                   | 62.4                            |
| M20_C38_B350 | 100 | 616.2     | 481.7                   | 490.3                   | 79.6                            |
| M20_C38_B400 | 125 | 604.9     | 579.2                   | 569.0                   | 94.1                            |
| M20_C38_B450 | 150 | 611.7     | -                       | <b>642.5</b>            | 105.0                           |

Primenom izraza (6.14) izračunata je granična nosivost konektora u blizini ivice betona, opterećenih na smicanje paralelno sa ivicom  $V_{cu,90^\circ,cal}$ , za sve FE modele obuhvaćene parametarskom analizom. Sile  $V_{cu,90^\circ,cal}$  su prikazane u tabeli 6.6. Vrednosti ove sile za modele kod kojih nije došlo do loma po betonu usled blizine ivice, za koje važi uslov  $V_{cu,90^\circ,cal} > P_{ult}$  su boldovane.

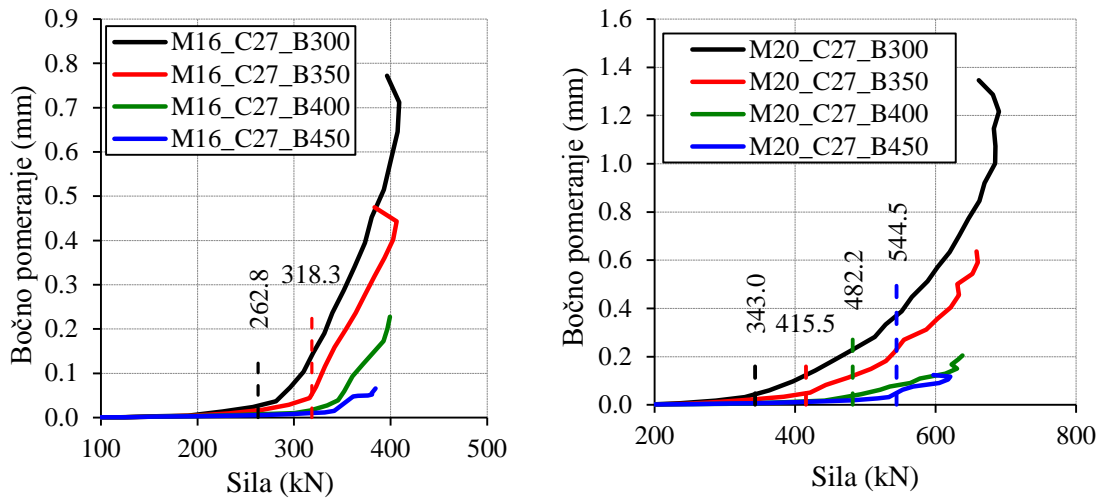
Na dijagrami na slici 6.27 prikazano je poređenje sila nosivosti po betonu  $V_{cu,90^\circ,num}$  utvrđenih na numeričkim FE modelima i  $V_{uc,90^\circ,cal}$ , određenih analitički, na osnovu izraza (6.14), gde se može uočiti odlično slaganje rezultata.



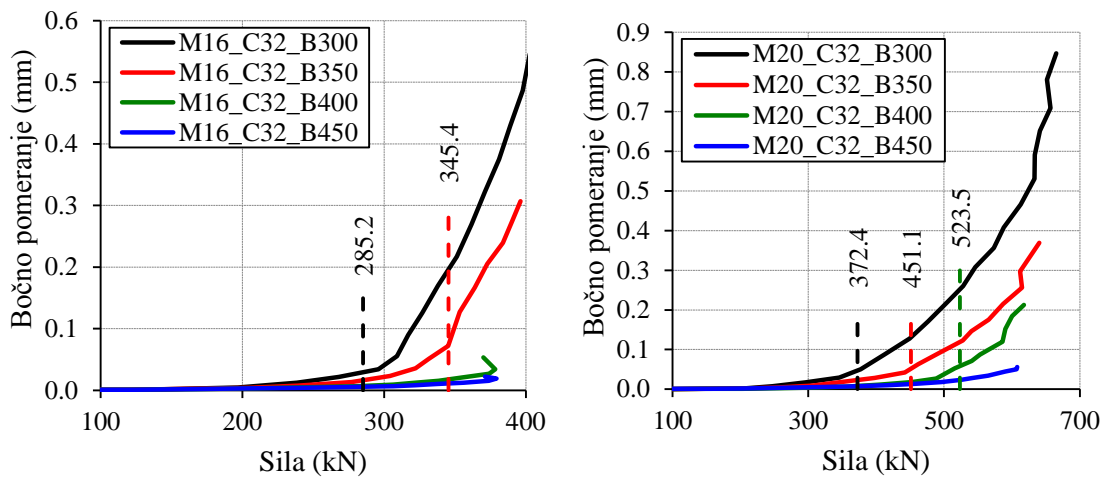
**Slika 6.27** Poređenje nosivosti smičućih konektora usled blizine ivice (FE modeli obuhvaćeni parametarskom analizom)

Kao rezultat parametarske analize dobijeni su dijagrami zavisnosti bočnih horizontalnih pomeranja od ukupne spoljašnje sile na FE modelima. Razmatrana bočna horizontalna pomeranja predstavljaju horizontalno razmicanje ose smičućeg konektora i ivice AB prizme. Dijagrami bočnih horizontalnih pomeranja za save FE modele su prikazani na slikama 6.28 do 6.30. Na dijagramima su naznačene odgovarajuće vrednosti analitički izračunatih vrednosti sila pri kojima dolazi do loma po betonu usled blizine ivice. Vrednosti ovih sila su na dijagramima prikazane isprekidanim linijama iste boje kao i dijagram horizontalno bočno pomeranje – sila za odgovarajući FE model.

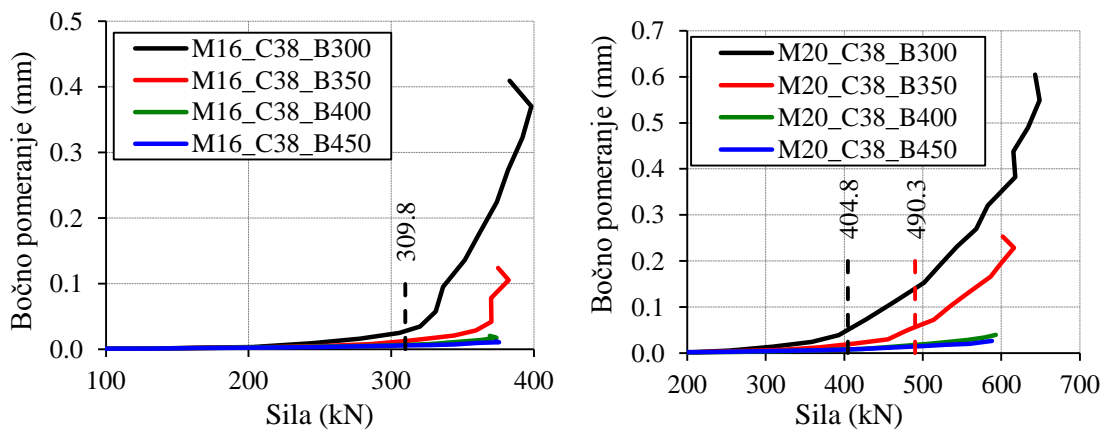




**Slika 6.28** Bočno pomeranje FE modela klase betona C27



**Slika 6.29** Bočno pomeranje FE modela klase betona C32



**Slika 6.30** Bočno pomeranje FE modela klase betona C38

U tabeli 6.7 prikazana su bočna horizontalna pomeranja  $\Delta_{h(V)}$  za pojedine FE modele, kao i odgovarajuće analitički nosivosti po betonu usled blizine ivice (izraz (6.14)). U istoj tabeli su prikazana i relativna bočna horizontalna pomeranja  $\varepsilon_h = \Delta_{h(V)}/c$ .

**Tabela 6.7** Relativna bočna pomeranja pri nastanku loma usled blizine ivice

| Model        | $c$ | $V_{u,90^\circ}$ | $\Delta_{h(V)}$ | $\varepsilon_h = \Delta_{h(V)}/c$ |
|--------------|-----|------------------|-----------------|-----------------------------------|
|              | mm  | kN               | mm              | ‰                                 |
| M16_C27_B300 | 75  | 262.78           | 0.027           | 0.353                             |
| M16_C32_B300 | 75  | 285.16           | 0.029           | 0.391                             |
| M16_C38_B300 | 75  | 309.77           | 0.027           | 0.364                             |
| M20_C27_B300 | 75  | 343.00           | 0.043           | 0.580                             |
| M20_C32_B300 | 75  | 372.41           | 0.047           | 0.625                             |
| M20_C38_B300 | 75  | 404.77           | 0.051           | 0.678                             |
| M16_C27_B350 | 100 | 318.34           | 0.053           | 0.528                             |
| M16_C32_B350 | 100 | 345.45           | 0.075           | 0.746                             |
| M20_C27_B350 | 100 | 415.51           | 0.049           | 0.487                             |
| M20_C32_B350 | 100 | 451.14           | 0.052           | 0.517                             |
| M20_C38_B350 | 100 | 490.34           | 0.056           | 0.561                             |
| M20_C27_B400 | 125 | 482.16           | 0.038           | 0.304                             |
| M20_C32_B400 | 125 | 523.50           | 0.058           | 0.467                             |
| M20_C27_B450 | 150 | 544.48           | 0.049           | 0.326                             |

Iz rezultata prikazanih u tabeli 6.7 se može zaključiti da relativna bočna pomeranja  $\varepsilon_h$  zavise pre svega od smičuće sile pri kojoj dolazi do loma po betonu usled blizine ivice, a samim tim i od klase betona i prečnika mehaničke spojnice. Može se zaključiti da vrednosti relativnog bočnog pomeranja na numeričkim FE modelima  $\varepsilon_h > 0.3\%$  ukazuje na mogućnost pojave loma po betonu usled blizine ivice, i predstavlja indicaciju za detaljniju analizu nosivosti po betonu u blizini ivice. Ova se nosivost može odrediti iz vrednosti parametra DMAGET, kao rezultata FE analize, prema prikazanom kriterijumu (slika 6.24), ili analitički, pomoću izraza (6.14).

Kriterijum koji ukazuje na mogućnost pojave loma po betonu usled blizine ivice u funkciji od rastojanja konektora od ivice je definisan, za primenu u projektovanju, u [CEN TS 2, 2009], za naknadno ugrađene ankere, opterećene smičućom silom upravno na ivicu, kao  $c_1 < (\min(60d_{nom}, 10l_f))$ , gde je  $c_1$  minimalno rastojanje od ankera do ivice u proizvoljnom pravcu. U svojim eksperimentalnim istraživanjima [Grosser, 2012] je pokazao da, za ankere opterećene paralelno sa ivicom, se ovaj uslov, za primenu u projektovanju, može svesti na manje strog uslov, dat izrazom (6.15).

$$c_1 \leq \min(30d, 5l_f) \quad (6.15)$$

U tabeli 6.6 prikazane su vrednosti graničnih sila po betonu usled blizine ivice  $V_{uc,90^\circ,num}$ , dobijene kao rezultat numeričke parametarske analize u prethodnom poglavlju.

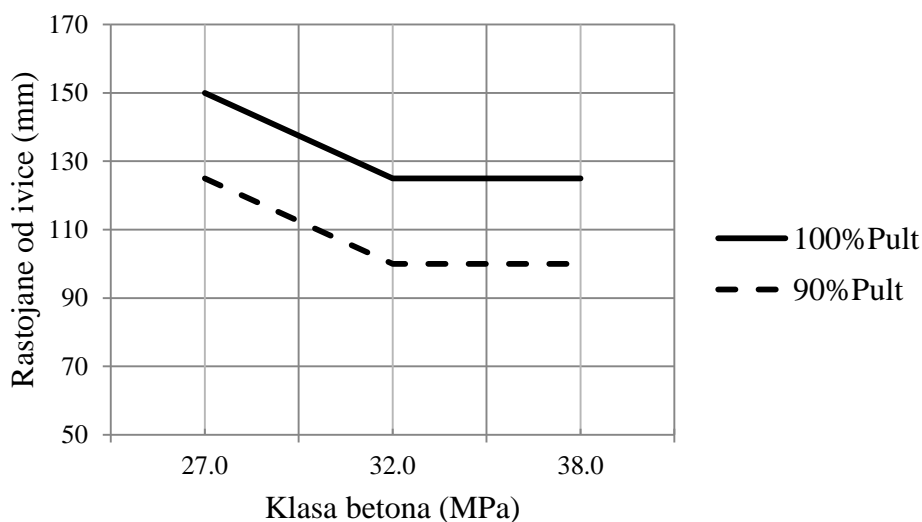
Granično rastojanje konektora od ivice, pri kom ne dolazi do loma usled blizine ivice, označeno sa  $c_{lim}$ , prikazano je u tabeli 6.8 u funkciji od čvrstoće betona pri pritisku.

**Tabela 6.8** Granična rastojanja konektora od ivice

| Klasa betona | $c_{lim}$ (mm)             |               |                            |               |
|--------------|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|              | M16 - $d_{co}=22\text{mm}$ |               | M20 - $d_{co}=27\text{mm}$ |               |
| $f_{cm}$     | 100% $P_{ult}$             | 90% $P_{ult}$ | 100% $P_{ult}$             | 90% $P_{ult}$ |
| 27.0         | 150                        | 125           | -                          |               |
| 32.0         | 125                        | 100           | -                          | 150           |
| 38.0         | 125                        | 100           | 150                        | 125           |

U tabeli su prikazane dve vrednosti, za uslov da do loma usled ivice betona dolazi kada je  $V_{uc,90^\circ,num} < P_{ult}$ , odnosno  $V_{uc,90^\circ,num} < 0.9P_{ult}$ .

Zavisnost graničnog rastojanja od čvrstoće betona pri pritisku, za konektor sa zavrtnjem M16, prikazana je na slici 6.31.



**Slika 6.31** Granično rastojanje od ivice u funkciji od klase betona

Sa dijagrama na slici 6.31 sledi da, za zadatu klasu betona, i za rastojanja konektora od ivice manja od vrednosti definisane krivom na dijagramu postoji mogućnost loma po betonu usled blizine ivice. U konkretnom slučaju (tabela 6.8), vrednosti  $c_{lim}$  se kreću u granicama od  $4.5d_{co}$  do  $6.8d_{co}$ , što je znatno ispod uslova datog izrazom (6.15). Sledi zaključak da granična vrednost rastojanja konektora od ivice pri kojoj se javlja mogućnost pojave loma po betonu usled blizine ivice zavisi od čvrstoće

pri pritisku. Takođe se može zaključiti da je kriterijum definisan izrazom (6.15), iako namenjen za potrebe projektovanja, značajno na strani sigurnosti.

Na osnovu analize rezultata eksperimentalnog ispitivanja uzoraka, kao i rezultata numeričke analize na FE modelima, može se zaključiti da se za proračun granične nosivosti smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom po betonu u blizini ivice, kada je konektor opterećen smičućom silom paralelnom sa ivicom, može koristiti izraz (6.14) koji je predložio [Grosser, 2012] za odgovarajuće opterećene ankere, uz prethodni proračun efektivne dužine konektora dat izrazom (6.5), koji je definisan na osnovu rezultata istraživanja u okviru ove teze.

Kada se uzme u obzir da se odnos karakteristične i srednje nosivosti može izraziti kao  $V_{Rk,c,90^\circ} = 0.75 V_{uc,90^\circ}$ , na osnovu koeficijenta varijacije od 15% [CEB-FIP, 2011], kao i da odnos čvrstoće betonske kocke stranice 200 mm i cilindra prečnika 150 i visine 300 mm iznosi  $f_{cc,200}/f_{cm} = 1.2$ , iz izraza (6.14) sledi

$$V_{Rk,c,90^\circ} = \frac{0.75 \cdot 43}{\sqrt{1.2}} \cdot c_1^{2/3} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot d \cdot (l_f/12d)^{0.3} \quad (6.16)$$

pa je karakteristična nosivost smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom po betonu u blizini ivice, kada je konektor opterećen smičućom silom paralelnom sa ivicom, u neisprskalom betonu, data izrazom:

$$V_{Rk,c,90^\circ} = 35 \cdot c_1^{2/3} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot d \cdot (l_f/12d)^{0.3} \quad (6.17)$$

gde je  $f_{ck}$  karakteristična čvrstoća betonskog cilindra prečnika 150 mm i visine 300 mm pri pritisku.

Pri proveru granične nosivosti smičućeg konektora po betonu u blizini ivice za zadata proračunsku smičuću silu  $V_{Sd}$  koja deluje paralelno sa ivicom, potrebno je dokazati da je zadovoljen uslov dat izrazom :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c,90^\circ} = V_{Rk,c,90^\circ} / \gamma_{Mc} \quad (6.18)$$

gde je  $\gamma_{Mc}$  koeficijent sigurnosti za beton. Preporučena vrednost je  $\gamma_{Mc} = 1.5$  [EC2, 2004].

## 6.5 Pomerljivost i duktilnost smičućeg konektora sa mehaničkom spojnicom

Maksimalna granična pomeranja smičućih konektora su, na eksperimentalno ispitivanim uzorcima, analizirana u poglavlju 3 (paragraf 3.6.3). Granična pomeranja dobijena kao rezultat numeričke analize FE modela koji odgovaraju ispitivanim uzorcima (tabela 4.2 u poglavlju 4), kao i rezultati numeričkog proračuna u okviru

parametarske analize (tabela 5.3 u poglavlju 5), po svojim vrednostima odgovaraju maksimalnim pomeranjima dobijenim eksperimentalnim ispitivanjem. S obzirom na način loma smičućeg konektora, smicanjem po zavrtnju, veličina graničnih pomeranja  $\delta_u$ , merenih od kraja cikličnog opterećenja (slika 3.27), je relativno mala, posebno imajući u vidu uslov koji propisuje [EC4, 2004], od  $\delta_{uk} = 6$  mm, kao granicu za duktilno ponašanje smičućih spojeva u spregnutim konstrukcijama od čelika i betona. Prema rezultatima parametarske analize (slike 5.16 i 5.17, poglavlje 5), samo konektor sa zavrtnjem M20, u betonu C27, na minimalnom rastojanju od 75 mm od ivice, zadovoljava ovaj uslov.

Konektori sa mehaničkom spojnicom ugrađeni u armirano betonske elemente niže čvrstoće betona pri pritisku i na manjem rastojanju od ivice betona, pokazuju veća pomeranja, kao posledicu većih oštećenja pritisnutog betona i pojave loma po betonu usled blizine ivice. Ovaj efekat je izraženiji kod konektora sa zavrtnjem i mehaničkom spojnicom većeg prečnika.

Ponašanje smičućih konektora, razmatranih u okviru numeričke parametarske analize na FEM modelima, u fazi eksploatacije je analizirano na osnovu procene nivoa eksploatacione sile na osnovu maksimalnih proračunskih sila  $V_{Ed}$ :

$$V_{Ed} = V_{Rd} = V_{Rk}/\gamma_M \quad (6.19)$$

Proračunske sile su definisane izrazom (6.9) u slučaju dostizanja granične nosivosti na smicanje zavrtnja, odnosno izrazom (6.18) u slučaju loma betona usled blizine ivice. Ukoliko se pretpostavi srednji koeficijent sigurnosti za opterećenje  $\gamma_{G+P}=1.4$ , sledi:

$$V_{expl} = V_{Ed}/\gamma_{G+P} = V_{Ed}/1.4 \quad (6.20)$$

Ovako izračunate eksploatacione sile  $V_{expl}$  prikazane su u tabeli 6.9. Početnu vrednost za proračun predstavljaju srednje granične sile  $V_u$ , koje su preuzete iz tabele 6.6. U slučaju loma po betonu usled blizine ivice  $V_u=V_{uc,90°,cal}$ , Karakteristična vrednost je izračunata prema izrazu (6.17). U slučaju loma zavrtnja na smicanje  $V_u=P_{ult}$  (zasivljena polja u tabeli 6.9), a karakteristična vrednost je izračunata kao  $V_{Rk,s}=0.9 \cdot P_{ult}$ .

Za, na prethodno opisan način, izračunate sile  $V_{expl}$ , dobijena su odgovarajuća vertikalna pomeranja  $\delta_v$  sa dijagrama sila vertikalno – pomeranje prikazanim na slikama 5.2 do 5.7 u poglavlju 5. Odgovarajuća horizontalna pomeranja  $\delta_h$  dobijena su sa

dijagrama sila – horizontalno pomeranje, koji su prikazani na slikama 6.27 do 6.29 u ovom poglavlju.

**Tabela 6.9** Pomeranja smičućeg konektora pri eksploatacionom opterećenju

| $V_u$ | $\gamma_M$ | $V_{Ed}$ | $V_{expl}$ | $\delta_v$ | $\delta_h$ |
|-------|------------|----------|------------|------------|------------|
| kN    |            | kN       | kN         | mm         | mm         |
| 262.8 | 1.50       | 142.6    | 101.9      | 0.179      | 0.0006     |
| 318.3 | 1.50       | 172.7    | 123.4      | 0.229      | 0.0011     |
| 399.4 | 1.15       | 312.5    | 223.2      | 0.545      | 0.0046     |
| 384.4 | 1.15       | 300.8    | 214.9      | 0.512      | 0.0037     |
| 285.2 | 1.50       | 154.7    | 110.5      | 0.189      | 0.0006     |
| 345.4 | 1.50       | 187.5    | 133.9      | 0.253      | 0.0014     |
| 378.4 | 1.15       | 296.2    | 211.6      | 0.476      | 0.0035     |
| 379.2 | 1.15       | 296.7    | 212.0      | 0.482      | 0.0031     |
| 309.8 | 1.50       | 168.1    | 120.1      | 0.202      | 0.0005     |
| 382.3 | 1.15       | 299.2    | 213.7      | 0.463      | 0.0032     |
| 373.7 | 1.15       | 292.4    | 208.9      | 0.441      | 0.0028     |
| 375.6 | 1.15       | 293.9    | 209.9      | 0.457      | 0.0026     |
| 343.0 | 1.50       | 186.1    | 132.9      | 0.206      | 0.0009     |
| 415.5 | 1.50       | 225.5    | 161.1      | 0.261      | 0.0013     |
| 482.2 | 1.50       | 261.6    | 186.9      | 0.302      | 0.0011     |
| 544.5 | 1.50       | 295.5    | 211.0      | 0.346      | 0.0023     |
| 372.4 | 1.50       | 202.1    | 144.3      | 0.223      | 0.0010     |
| 451.1 | 1.50       | 244.8    | 174.9      | 0.267      | 0.0013     |
| 523.5 | 1.50       | 284.1    | 202.9      | 0.316      | 0.0014     |
| 607.0 | 1.15       | 475.1    | 339.3      | 0.689      | 0.0063     |
| 404.8 | 1.50       | 219.6    | 156.9      | 0.231      | 0.0010     |
| 490.3 | 1.50       | 266.1    | 190.1      | 0.277      | 0.0014     |
| 604.9 | 1.15       | 473.4    | 338.1      | 0.641      | 0.0047     |
| 611.7 | 1.15       | 478.7    | 341.9      | 0.658      | 0.0054     |

Vertikalna pomeranja  $\delta_v$  su manja od 1 mm za sve modele. Ovim pomeranjima treba dodati i inicijalna pomeranja  $\delta_{ini}$ , koja nastaju usled zazora rupe za zavrtanj. U cilju procene ovih pomeranja, mogu poslužiti rezultati eksperimentalnih merenja inicijalnih pomeranja na uzorcima serije A, koji su prikazani na slici 3.56 u poglavlju 3. Ova pomeranja se kreću u granicama od 1 do 1.5mm. Ukupna vertikalna pomeranja u fazi eksploatacije, za razmatrane modele, iznose maksimalno 2.5 mm. Ovakva vrednost se

može smatrati prihvatljivom sa aspekta upotrebe smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom u spojevima spregnutih konstrukcija.

Horizontalna pomeranja  $\delta_h$ , prikazana u tabeli 6.9, predstavljaju promenu horizontalnog rastojanja između smičićeg konektora i ivice betona. U tom smislu, kao što je rečeno u prethodnom paragrafu, predstavljaju indikaciju nastanka kosih prslina u blizini ivice betona. Maksimalna vrednost horizontalnog pomeranja u fazi eksploatacije, dobijena na osnovu numeričke analize na FEM modelima, iznosi 0.006 mm, što na osnovu dijagrama na slikama 6.27 do 6.29, ukazuje da nije došlo do nastanka kosih prslina. Može se zaključiti, na osnovu prikazane analize, da se kod smičućih konektora, za koje je je dokazana nosivost po betonu usled blizine ivice u skladu sa paragrafom 6.4.1 i 6.4.2 ovog poglavlja, neće javiti kose prsline u fazi eksploatacije.

Ponašanje smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom pri porastu opterećenja, kao i njihova krutost, kao što je prikazano u paragrafu 5.4.2, mogu se uporediti sa konektorima od ubetoniranih zavrtnjeva sa jednom ugrađenom maticom [Pavlović, 2014], što se naročito odnosi na relativno velika pomeranja pri cikličnom opterećenju i raniji prelazak krive sila – vertikalno pomeranje u nelinearnu oblast.

## 7 Zaključci i završna razmatranja

Nakon izvršenog detaljnog istraživanja savremene naučnoistraživačke i stručne literature u oblasti smičućih spojeva između čelika i betona ostvarenih preko zavarenih moždanika sa glavom, ubetoniranih zavrtnjeva, naknadno ugrađenih ankera i konektora sa mehaničkim spojnicama, vršena su eksperimentalna, numerička i teorijska istraživanja granične nosivosti i ponašanja smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom. Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena na 18 uzoraka, raspoređenih u 5 serija. Numerička nelinearna analiza u programu ABAQUS sprovedena je na 28 numeričkih modela u konačnim elementima. Na osnovu rezultata istraživanja u okviru ove teze, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- 1) Na osnovu rezultata istraživanja u okviru ove disertacije može se zaključiti da se smičući konektori sa mehaničkom spojnicom i armaturnim ankerom, sa aspekta nosivosti, kao i ponašanja pri eksploatacionom opterećenju, mogu koristiti u konstrukcijama kao elementi smičićeg spoja između čelika i betona.
- 2) Nosivost i ponašanje konektora sa mehaničkom spojnicom pri dejstvu smicanja se može uporediti sa ponašanjem naknadno ugrađenih ankera i ostalih ankera koji se ne sidre glavom.
- 3) Prilikom eksperimentalnog ispitivanja i numeričkog modeliranja smičućih spojeva preko konektora sa mehaničkom spojnicom, kod većeg se broja istraživanih konektora lom javio po betonu usled blizine ivice, u obliku kosih pukotina i odvaljivanja dela zaštitnog sloja. Nakon loma zaštitnog sloja betona, na ispitivanim modelima je bilo moguće dalje povećavanje spoljnog opterećenja, do konačnog otkaza usled loma zavrtnja na smicanje.
- 4) Na ostalim eksperimentalno ispitivanim i numerički modeliranim konektorima sa mehaničkom spojnicom, kod kojih nije došlo do loma po betonu usled blizine ivice, utvrđen je lom nastao smicanjem zavrtnja.
- 5) Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih, numeričkih i teorijskih istraživanja u okviru ove disertacije, razvijen je originalni izraz za određivanje efektivne zamenjujuće dužine konektora sa mehaničkom spojnicom konstantnog poprečnog preseka, u funkciji prečnika zavrtnja i mehaničke spojnice i čvrstoće betona pri pritisku.



- 6) Granična nosivost smičućeg konektora po betonu u blizini ivice, može se odrediti korišćenjem izraza za određivanja nosivosti za naknadno ugrađene ankere, opterećene paralelno sa ivicom betonskog elementa, uz prethodno određivanje efektivne dužine zamenjujućeg konektora sa mehaničkom spojnicom, prema izrazu datom u ovoj disertaciji.
- 7) Parametarskom analizom je utvrđeno da maksimalna granična pomeranja i pojava loma po betonu usled blizine ivice, kod konektora sa mehaničkom spojnicom najviše zavise od rastojanja konektora od ivice armiranobetonskog elementa, čvrstoće betona pri pritisku, kao i prečnika zavrtnja i spojnice.
- 8) Na nelinearnim numeričkim modelima je istraživana efekat trenja između površina čeličnog i armiranobetonskog elementa u spregnutom spoju opterećenom na smicanje. Ustanovljeno je da sila trenja u graničnoj nosivosti učestvuje i do 12%.
- 9) Smičući konektori sa mehaničkom spojnicom pokazuju veća pomeranja u nelinearnoj oblasti i veću duktilnost pri većim prečnicima zavrtnja i mehaničke spojnice, nižim čvrstoćama betona pri pritisku i manjoj udaljenosti konektora od ivice armiranobetonskog elementa.
- 10) Nakon dostizanja granične nosivosti pri eksperimentalnom ispitivanju smičućih konektora, u 13.8% slučajeva su na mehaničkim spojnica uočena oštećenja u obliku pukotina na jednom ili oba zida spojnice, koja nastaju usled pojave visokih napona zatezanja u zidu mehaničke spojnice upravno na njenu osu. Ova oštećenja ne utiču u značajnoj meri na nosivost i maksimalno pomeranje ispitivanih uzoraka konektora.
- 11) Vertikalno pomeranje (proklizavanje) istraživanih spojeva pri eksploatacionom opterećenju nije veće od 2.5 mm, uključujući i inicijalno pomeranje usled zazora rupe za zavrtnj na flanši čeličnog profila.
- 12) Na osnovu eksperimentalnog ispitivanja uzoraka i ponašanja numeričkih modela u programu ABAQUS u okviru disertacije, pri eksploatacionim opterećenjima ne nastaju prsline u betonskim elementima u okolini smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom.

Na osnovu prezentovanih rezultata istraživanja, kao i izvedenih zaključaka, u cilju još boljeg i detaljnijeg sagledavanja graničnih i eksploatacionih stanja smičućih konektora sa mehaničkom spojnicom, potrebno je istaći određeni broj preporuka i pravaca daljih istraživanja:

- 1) Potrebno je istražiti mogućnost primene zavrtnejeva više klase i veće čvrstoće, kao i njihovu interakciju sa mehaničkim spojnica raspoloživim na tržištu, pri dostizanju graničnih stanja nosivosti.
- 2) Buduća parametarska istraživanja treba organizovati sa većim rasponom vrednosti parametara kao što su čvrstoća betona pri pritisku i prečnik konektora, kako bi se detaljnije definisali precizniji kriterijumi za nastanak loma po betonu usled blizine ivice, preko graničnog rastojanja konektora od ivice u funkciji od čvrstoća betona pri pritisku i prečnika mehaničke spojnice.
- 3) Potrebno je istražiti mogućnost primene dodatne armature postavljene lokalno u blizini konektora u cilju povećanja nosivosti konektora po betonu usled blizine ivice armiranobetonskog elementa.
- 4) U narednim istraživanjima treba ispitati graničnu nosivost konektora sa mehaničkom spojnicom pri simultanom dejstvu smičuće sile i aksijalnog zatezanja.
- 5) Buduća istraživanja u ovoj oblasti treba da utvrde efekat rastojanja konektora i njihovo grupisanje na graničnu nosivost i ponašanje pri smičućem opterećenju.
- 6) Potrebno je sprovesti ciklična alternativna smičuća opterećenja konektora sa mehaničkom spojnicom, sa i bez sile zatezanja, kako bi se utvrdila njihova nosivost, duktilnost i ponašanje pri dinamičkom ili seizmičkom opterećenju.
- 7) Dispoziciju daljih eksperimentalnih istraživanja treba dopuniti tako da se, pri eksploatacionim opterećenjima, detaljnije može pratiti nastanak i razvoj kosih prslina.

## 8 Literatura

- [ABAQUS, 2012] ABAQUS User Manual. Version 6.12. Providence, RI, USA: DS SIMULIA Corp; 2012.
- [ACI 318, 2004] ACI 318M-05: Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI Committee 318 Structural Building Code 2004
- [Anderson et al., 2005] Anderson N. S., Meinheit D. F. Pryout Capacity of Cast-In Headed Stud Anchors. PCI Journal 2005, 2:90-112
- [ANSI 360-05, 2005] ANSI/AISC 360-05: Specification for structural steel buildings. Chicago, IL, USA: American Institute for Steel Construction (AISC); 2005.
- [Browser, 2010] Bowser, M. G. Development of a Shear Connection for a Portable Composite Bridge. MSc thesis. University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010
- [Brungraber, 2009] Brungraber G. R. Long-Term Performance of Epoxy-Bonded Rebar-Couplers. PhD thesis. University of California, San Diego 2009
- [CEB-FIP Model code, 1990] Model code for concrete structures. International Federation for Structural Concrete (fib) 1990.
- [CEB-FIP, 2011] Design of Anchorages in Concrete (fib Bulletin 58). International Federation for Structural Concrete (fib) 2011.
- [CEN/TS 1, 2009] CEN/TS 1992-4-1:2009. Design of fastenings for use in concrete. Part 4-1 General. Drafts for Development, British Standards, 2009
- [CEN/TS 2, 2009] CEN/TS 1992-4-1:2009. Design of fastenings for use in concrete. Part 4-2 Headed Fasteners. Drafts for Development, British Standards, 2009
- [Dallam, 1968] Dallam LN. High Strength Bolts Shear Connectors - Pushout Tests. ACI Journal 1968; Proceeding(No. 9):767-769.

- [Dedic and Klaiber, 1984] Dedic DJ, Klaiber WF. High-Strength Bolts as Shear Connectors in Rehabilitation Work. Concrete international 1984;6(7):41–46.190
- [EC2, 2004] EN1992-1-1: Eurocode 2 - Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2004.
- [EC3 Part 1-8, 2005] EN1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2005.
- [EC3, 2005] EN1993-1-1: Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2005.
- [EC4, 2004] EN1994-1-1: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN); 2004.
- [ECCS, 1985] ECCS Publication No38 - European Recommendations for Bolted Connections in structural steelwork. Brussels, Belgium: ECCS; 1985 p. 63.
- [Fallon, 2005] Fallon J. Testing of reinforcing bar couplers. CONCRETE, April 2005; 24-25
- [GB50010, 2002] GB50010-2002: Code for Design of Concrete Structures. Ministry of housing and urban–rural development of China; 2002.
- [Grosser, 2012] Grosser P. Load-bearing behavior and design of anchorages subjected to shear and torsion loading in uncracked concrete. PhD thesis. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart 2012

- [Hällmark, 2012] Hällmark R. Prefabricated Composite Bridges - a Study of Dry Deck Joints. Luleå University of Technology; 2012 p. 228.
- [Hawkins, 1987] Hawkins N. Strength in shear and tension of cast-in-place anchor bolts. Anchorage to Concrete 1987;SP-103:233–255.
- [Hoehler, 2006] Hoehler M. S. Behavior and Testing of Fastenings to Concrete for use in Seismic Applications. PhD thesis. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart 2006
- [ISO 15835-1, 2009] ISO 15835-1:2009(E). Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars. Part 1: Requirements
- [ISO 15835-2, 2009] ISO 15835-2:2009(E). Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars. Part 2: Test methods
- [Jankowiak and Lodigowski, 2005] Jankowiak T, Lodigowski T. Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. Foundations of Civil and Environmental Engineering. 2005;6:53–69.
- [JSCE, 2009] Standard Specification for Design of Steel and Composite Structures: I General Provision, II Structural Planning, III Design. First edition 2007. Japan Society of Civil Engineers 2009
- [Koster, 2005] Composite Construction with KÖCO Stud Welding Technology. Köster & Co. GmbH 2005
- [Kwon, 2008] Kwon G. Strengthening existing steel bridge girders by the use of post-installed shear connectors. PhD thesis. The University of Texas at Austin; 2008:p239.
- [Lam and El-Lobody, 2005] Lam D, El-Lobody E. Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam. Journal of Structural Engineering, ASCE 2005;131(1):96–108.

- [Lam et al., 2013] Lam D, Dai X, Saveri E. Behaviour of demountable shear connectors in steel-concrete composite beams. Proceedings of the 2013 Composite Construction in Steel and Concrete VII.
- [Lenton Katalog, 2008] Lenton katalog: Sustavi spajanja armature spojnicama s koničnim navojem. ERICO International Corporation 2008
- [Lenton Katalog, 2009] Lenton Catalogue: Why couplers? ERICO International Corporation 2009
- [Lenton Sertificate, 2012] Lenton Sertificate. Abnahmeprüfzeugnis 3.1 DIN EN 10204. Bestell-Nr 0195828, 201803, 0202496, 203636 und 204024. Saar Blankstahl GmbH – Werk Homburg 2012.
- [Marshall et al., 1971] Marshall WT, Nelson HM, Banarjee HK. An experimental study of the use of high strength friction-grip bolts as shear connectors in composite beams. The Structural Engineer 1971;49(4):171-178.
- [NA SRPS EN 1994-1-1] Evrokod 4 — Projektovanje spregnutih konstrukcija od čelika i betona — Deo 1-1: Opšta pravila i pravila za zgrade — Nacionalni prilog
- [Nguyen and Kim, 2009] Nguyen HT, Kim SE. Finite element modelling of push-out tests for large stud shear connectors. Journal of Constructional Steel Research 2009;65(10-11):1909–1920.
- [Oehlers, 1980] Oehlers D. J. Stud Shear Connectors for Composite Beams. PhD thesis. University of Warwick, 1980
- [Okada et al., 2006] Okada J, Teruhiko Y, Lebet JP. 2006. A study of the grouped arrangements of stud connectors on shear strength behaviour. Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE 23(1):75s-89s.

- [Ollgaard et al., 1971] Ollgaard J., Slutter R., Fisher J. Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete. AISC ENGINEERING JOURNAL April 1971:55-64
- [Pallarés and Hajjar, 2010] Pallarés L, Hajjar JF. Headed steel stud anchors in composite structures, Part I: Shear. Journal of Constructional Steel Research. 2010 February;66(2):198–212.
- [Pavlović et al., 2014] Pavlović M., Marković Z., Veljković M., Budjevac D., Bolted Shear Connectors vs. Headed Studs Behaviour in Push-out Tests. Journal of Constructional Steel Research, doi: 10.1016/j.jcsr. 2013.05.003
- [Pavlović, 2014] Pavlović M. Resistance of Bolted Shear Connectors in Prefabricated Steel-Concrete Composite Decks. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014
- [Rowell et al., 2009] Rowell S., Grey C., Woodson S., Hager K. High Strain-Rate Testing of Mechanical Couplers. Final report. Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme, USA 2009
- [Sanada et al., 2011] Sanada Y. Konishi D. Khanh N. Adachi T. Experimental study on intensive shear reinforcement for RC beams with mechanical couplers. fib Symposium Prague 2011. Proceedings ISBN 978-80-87158-29-6
- [Shim et al., 2008] Shim CS, Lee, PG, Kim DW, Chung CH. 2008. Effects of Group Arrangement on the Ultimate Strength of Stud Shear Connection. Proceedings of the 2008 Composite Construction in Steel and Concrete Conference VI.194
- [Sprenić et al., 2013] Sprenić M, Marković Z, Veljković M, Budjevac D. Push-out experiments of headed shear studs in group arrangements. Advanced Steel Construction 2013;9(2):170–191.

- [Spremić, 2013] Analiza ponašanja grupe elastičnih moždanika kod spregnutih nosača od čelika i betona. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2013.
- [Xu et al., 2012] Xu C, Sugiura K, Wu C, Su Q. Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012;72:84–96.
- [Xue et al. 2, 2012] Xue D., Liu Y., Yu Z., He J. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge. *Journal of Constructional Steel Research* 2012, 74:1–7



## Biografija autora

Mr Branko Milosavljević, dipl.inž.građ. rođen je 01.10.1962. godine u Prokuplju. Osnovnu školu i srednju školu, usmerenje matematičko tehnički saradnik, završio je u Beogradu. Građevinski fakultet u Beogradu je upisao 1981. Studije je završio 1988. i diplomira na predmetu Betonske konstrukcije.

Od septembra 1988. godine zaposlen je na Građevinskom fakultetu, kao asistent pripravnik na grupi predmeta Betonske konstrukcije. Poslediplomske studije upisao je 1988. godine na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Magistarsku tezu pod nazivom "Ponašanje i otpornost armiranobetonskih i spregnutih stubova pri dejstvu požara" je odbranio 1993. Godine. Od 1993 godine radi na Građevinskom fakulteta u Beogradu, u zvanju asistenta na grupi predmeta Betonske konstrukcije.

Branko Milosavljević se, okviru svog naučnog rada, bavi problemima nosivosti i ponašanja armiranobetonskih i spregnutih konstrukcija, sa posebnim akcentom na oblasti graničnih stanja upotrebljivosti betonskih konstrukcija, kao i dejstvo požara i seizmike. Učestvovao je u više naučno istraživačkih projekata. Koautor je preko dvadeset naučnih i stručnih radova iz oblasti armiranobetonskih i spregnutih konstrukcija od čelika i betona, koji su objavljeni u časopisima, stručnim publikacijama, na kongresima i simpozijumima u zemlji i inostranstvu.

U okviru stručnog rada, učestvovao u izradi preko stotinu stručnih projekata i ekspertiza, kao član projektantskog tima u svim fazama projektovanja i izgradnje betonskih i čeličnih konstrukcija, uključujući mostove, zgrade, industrijske objekte i fundiranje, kao i ojačanje i sanaciju konstrukcija. Posедуje licencu za projektovanje objekata visokogradnje i član je Srpskog društva građevinskih konstruktera (SDGK), Saveza društava inženjera i tehničara Beograda (SDiT) i Inženjerske komore Srbije.

Branko Milosavljević tečno govori i piše engleski jezik. Oženjen je i otac je dvoje dece.

## Прилог 1.

### Изјава о ауторству

Потписани: Мр Бранко Милосављевић, дипл.грађ.инж.

Број уписа: Мр, одлука број 325/11

### Изјављујем


да је докторска дисертација под насловом:

ТЕОРИЈСКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПОНАШАЊА ВЕЗЕ  
АРМИРАНОБЕТОНСКОГ И ЧЕЛИЧНОГ ЕЛЕМЕНТА ПРЕКО АРМАТУРНИХ  
СПОЈНИЦА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користо интелектуалну својину других лица.

У Београду, јун 2014.

Потпис докторанда



**Прилог 2.**

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора:      **Мр Бранко Милосављевић, дипл.грађ.инж.**

Број уписа:                    **Мр, одлука број 325/11**

Студијски програм: **Грађевинарство**

Наслов рада:                    **ТЕОРИЈСКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО  
ИСТРАЖИВАЊЕ ПОНАШАЊА ВЕЗЕ  
АРМИРАНОБЕТОНСКОГ И ЧЕЛИЧНОГ  
ЕЛЕМЕНТА ПРЕКО АРМАТУРНИХ СПОЈНИЦА**

Ментор:                            **Др Душан Најдановић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет**

Потписани:                       **мр Бранко Милосављевић, дипл.грађ.инж.**

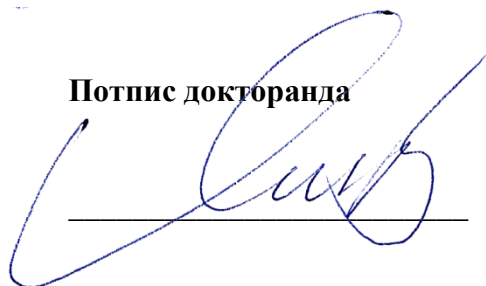
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, јун 2014.

**Потпис докторанда**



### Прилог 3.

#### Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом: ТЕОРИЈСКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ ПОНАШАЊА ВЕЗЕ АРМИРАНОБЕТОНСКОГ И ЧЕЛИЧНОГ ЕЛЕМЕНТА ПРЕКО АРМАТУРНИХ СПОЈНИЦА која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

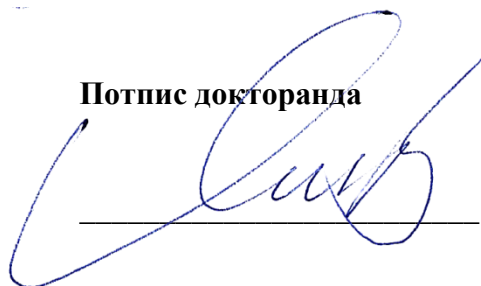
5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, јун 2014.

Потпис докторанда



1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

**2. Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.